



جامعة عباس لغرور خنشلة
UNIVERSITE ABBES LAGHROUR KHENCHELA
ABBES LAGHROUR UNIVERSITY OF KHENCHELA

2019

Faculté des Sciences de la nature et de la vie

Département Ecologie et environnement

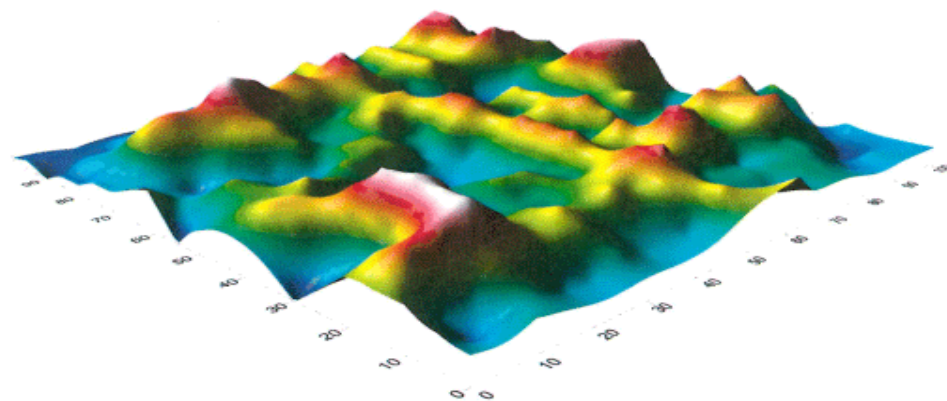
License Eaux et environnement L3 M03

Polycopié intitulé

CARTOGRAPHIE ET SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE (S.I.G)



Dr. Boulabeiz Mahrez



AVANT PROPOS

Le SIG est un domaine relativement nouveau, qui est apparu dans les années 1970. Le SIG, utilisant l'informatique, n'était disponible et utilisé que par des entreprises et des universités qui avaient un équipement informatique qui coûtait cher. De nos jours, quelqu'un ayant un ordinateur individuel ou un ordinateur portable peut utiliser un logiciel SIG. Au fil du temps, les applications SIG sont aussi devenues plus faciles à utiliser — cela a exigé beaucoup de formation pour utiliser une application SIG, mais maintenant il est beaucoup plus facile de commencer à utiliser un SIG, même pour des amateurs et des utilisateurs occasionnels. Comme nous l'avons déjà écrit, un SIG est bien plus qu'un logiciel, le SIG se réfère à tous les aspects de gestion et d'utilisation de données géographiques numériques. Le but de ce cours est d'acquérir les notions fondamentales nécessaires à la mise en place d'un SIG. L'aspect collecte des données issues de relevés de terrain sera présenté et appliqué dans les domaines de l'eau et l'environnement. Aussi initier les étudiants aux SIG en utilisant le logiciel ArcGis 10.xx. L'objectif sera de maîtriser les différentes étapes de prétraitements, de structuration et de représentation des données géographiques multisources (géoréférencement, numérisation, structuration, représentation spatiale et cartographie).

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| Avant propos | |
| Sommaire..... | 1 |
| Chapitre I : Rappel théorique..... | 4 |
| 1. Rappels sur les systèmes d'unité..... | 4 |
| 1.1. Le radian..... | 4 |
| 1.2 Le degré..... | 4 |
| 1.3 Le grade..... | 4 |
| 2. L'équivalence entre le temps, les distances et les angles..... | 5 |
| 3. De la terre à la carte | 6 |
| 3.1 La forme de la terre, champ de gravité et géodésie..... | 6 |
| 3.1.1 La terre : Sphère..... | 6 |
| 3.1.2 La Terre : Ellipsoïde de révolution | 6 |
| 3.1.3 La Terre : Géoïde..... | 7 |
| 3.2 <i>Les systèmes géodésiques</i> | 8 |
| 3.2.1 Les systèmes locaux | 8 |
| 3.2.2 Les systèmes globaux | 8 |
| 3.3 Les systèmes de coordonnées..... | 9 |
| 3.3.1 Système de coordonnées géographiques | 9 |
| 3.3.2 Un système de coordonnées projetées..... | 10 |
| 4. Les projections cartographiques..... | 11 |
| 4.1 L'indicatrice de TISSOT | 11 |
| 4.2 Les projections selon le type de représentation..... | 11 |
| 4.2.1 Les projections conformes..... | 11 |
| 4.2.2 Les projections équivalentes..... | 11 |
| 4.2.3 Les projections aphyllactiques..... | 11 |
| 4.3 Projections selon leur forme..... | 11 |
| 4.3.1 La projection conique | 11 |
| 4.3.2 Projections cylindriques..... | 12 |
| 4.3.3 Projections planaires | 12 |
| 5. Géoréférencement..... | 13 |

Chapitre II : notion de base d'un S.I.G..... 14

| | | |
|------|--|----|
| I. | Les définitions et fonction d'un S.I.G | 14 |
| II. | Historique | 15 |
| III. | Composants d'un SIG | 16 |
| a) | Le système de saisie numérique | 18 |
| b) | Le système de traitement d'images | 18 |
| c) | Le système de gestion et de la base de données | 18 |
| d) | Le système d'analyse statistique | 18 |
| e) | Le système d'analyse spatiale | 18 |
| f) | Le système de représentation cartographique | 19 |
| IV. | Mode de représentation d'un SIG | 20 |
| 1) | Mode raster..... | 20 |
| 2) | Le Mode vecteur..... | 21 |
| 3) | Combinaison des modes vecteur et raster | 22 |

Chapitre III : Acquisition de donnée..... 23

| | | |
|----|--|----|
| 1. | Introduction | 23 |
| 2. | Saisie des données spatiales | 23 |
| a. | Données existantes | 23 |
| b. | Numérisation | 24 |
| c. | Conversion | 24 |
| 3. | Saisie les attributs..... | 24 |
| 4. | Lien entre données spatiales et attributs..... | 24 |

Chapitre IV : Modélisation et analyse spatiale..... 26

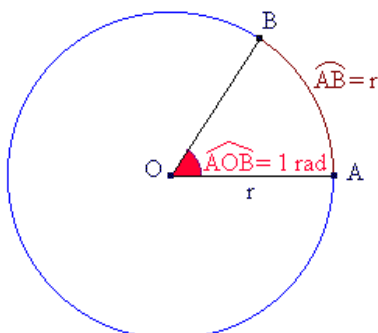
| | | |
|----|--|----|
| 1. | Introduction : | 26 |
| 2. | Notion de couche..... | 26 |
| 3. | La modélisation cartographique en mode vectoriel | 27 |
| 4. | La modélisation cartographique en mode matriciel | 27 |
| ▪ | Notion d'objet et de pixels | 27 |

| | | |
|---|--|-----------|
| ▪ | Couche identifiant et la modélisation entité-relation | 28 |
| 5. | Taches d'analyse spatiale : | 28 |
| 6. | Fonction d'analyse d'un SIG : | 29 |
| a) | Extraction de données | 29 |
| b) | Reclassification des données | 29 |
| c) | Superposition des données | 29 |
| d) | Concepts fondamentaux d'analyse spatiale par un SIG | 31 |
| Chapitre V : les principaux SIG les plus utilisés | | 34 |
| 1. | Logiciel libres..... | 34 |
| 2. | Logiciels commerciaux..... | 34 |
| Chapitre VI : présentation de quelques applications de SIG..... | | 35 |
| Partie 1 : Analyse multicritère (le cas de choix d'un site pour les rejets de déchets) ... | | 35 |
| Partie 2 : réalisation de la carte de vulnérabilité des nappes par la méthode DRASTIC | | 37 |
| 1. | Définition de la vulnérabilité d'une nappe à la pollution..... | 37 |
| 2. | Description de la méthode DRASTIC..... | 37 |
| 3. | Méthodologie appliquée par le SIG | 41 |
| Partie 2 : création d'un modèle numérique de terrain (MNT)..... | | 42 |
| Etape 1 : numérisation des courbes de niveau..... | | 42 |
| Etape 2 : exportation d'un fichier vectoriel et la conversion en format matriciel..... | | 42 |
| Etape 3 : Interpolation des courbes de niveau | | 43 |
| Etape 4 : Visualisation d'un MNT | | 44 |

Chapitre I : Rappel théorique

1. Rappels sur les systèmes d'unité

1.1. Le radian La notation du radian est « rad ». Un radian est l'angle formé par un arc de cercle égal au rayon R. Dans une circonférence, il y a 2π radians, avec $\pi = 3.14\dots$

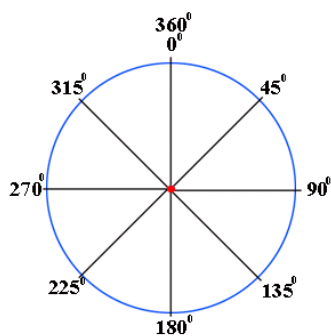


1.2 Le degré Le degré est l'unité angulaire qui divise une circonférence en 360 degrés. La notation du degré est « ° ».

Les calculs en degré sont « pénibles », car il s'agit comme pour l'heure d'un système sexagésimal. Les sous-multiples du degré sont :

◆ la minute sexagésimale, notée « ' » telle que $60' = 1^\circ$.

◆ la seconde, notée « '' » telle que $60'' = 1'$. Donc $1^\circ = 60' = 3\,600''$.



1.3 Le grade Le grade ou le gon, ou le degré centésimal est l'unité angulaire qui divise une circonférence en 400 grades. Un grade vaut $\pi / 200$ radian ou $0,9^\circ$. Le grade est noté « gr ».

C'est une unité décimale dont les sous-multiples sont :

- Le dixième de grade ou le décigrade (dgr) : $1 \text{ dgr} = 0.1 \text{ gr}$
- Le centième de grade ou le centigrade (cgr) : $1 \text{ cg} = 0.01 \text{ gr}$
- le milligrade (mgr) : $1 \text{ mgr} = 0.001 \text{ gr}$
- Le décimilligrade (dmgr) ou le centième de centigrade (cc) : $1 \text{ dmgr} = 1 \text{ cc} = 0.0001 \text{ gr}$.

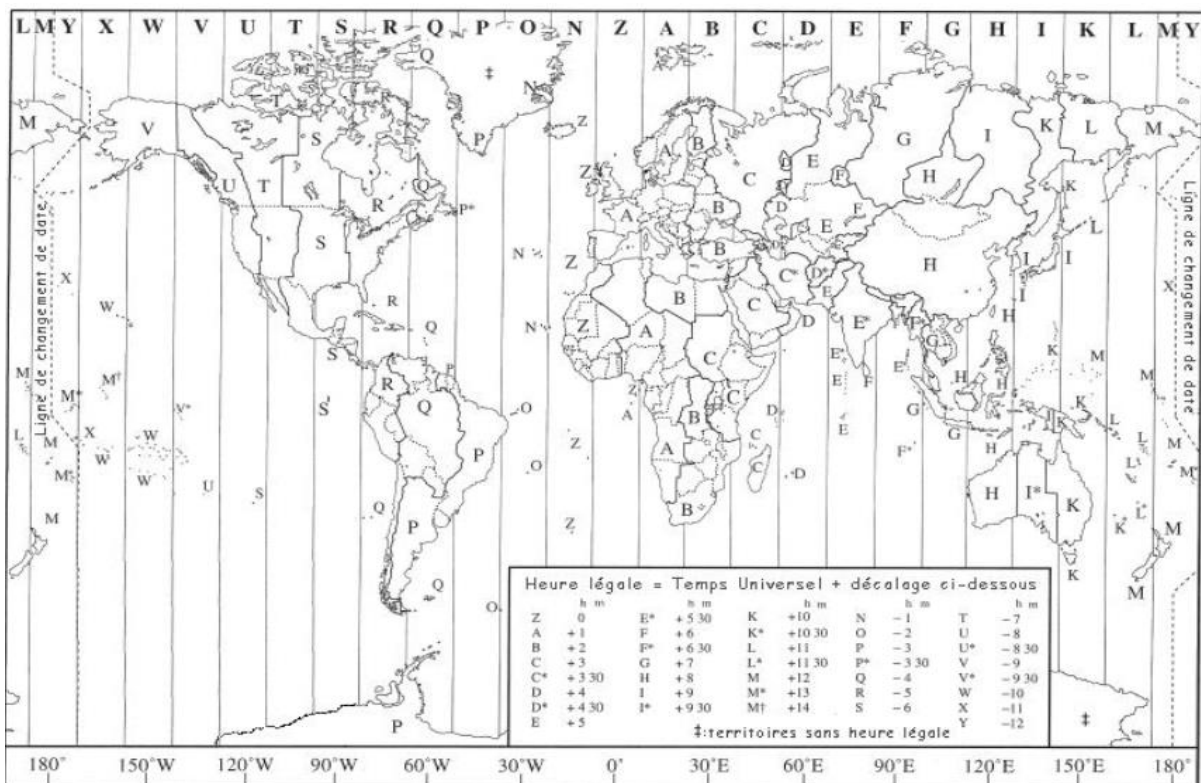
Tableau .1 table de correspondance des différentes unités d'angle

| Angles | Degrés | Radians | Grades |
|-------------|--------|--------------|----------------|
| Angle nul | 0° | 0 rad | 0 gon |
| | 30° | $\pi/6$ rad | 33,333... gon |
| | 45° | $\pi/4$ rad | 50 gon |
| | 60° | $\pi/3$ rad | 66,666... gon |
| Angle droit | 90° | $\pi/2$ rad | 100 gon |
| | 120° | $2\pi/3$ rad | 133,333... gon |
| Angle plat | 180° | π rad | 200 gon |
| Angle plein | 360° | 2π rad | 400 gon |

2. L'équivalence entre le temps, les distances et les angles

Le Temps Universel Coordonné (UTC) permet de mesurer le temps de façon uniforme sur Terre. Il est mesuré à partir du méridien de Greenwich, en Angleterre. Ainsi, lorsqu'il est midi à Greenwich, on dit qu'il est midi UTC (1200UTC).

La rotation est le mouvement où la Terre tourne sur elle-même en 1 journée (24 heures), il



faut approximativement 6 heures pour qu'un point, à la surface de la terre, tourne d'un angle de 90 degrés (ou 100 grades) autour de l'axe des pôles, Donc, en 1 heure de temps, on parcourt un angle de $90/6 = 15$ degrés ou un angle de $100/6 = 16,667$ grades.

Est puisque la circonférence de la terre est de 40074 km (circonférence de l'équateur) donc pour parcourir environ 10 000 km (1/4 de la circonférence de la terre) il faut 6 heures de temps. Les calculs se baseront sur le rayon de la Terre : 6378 km.

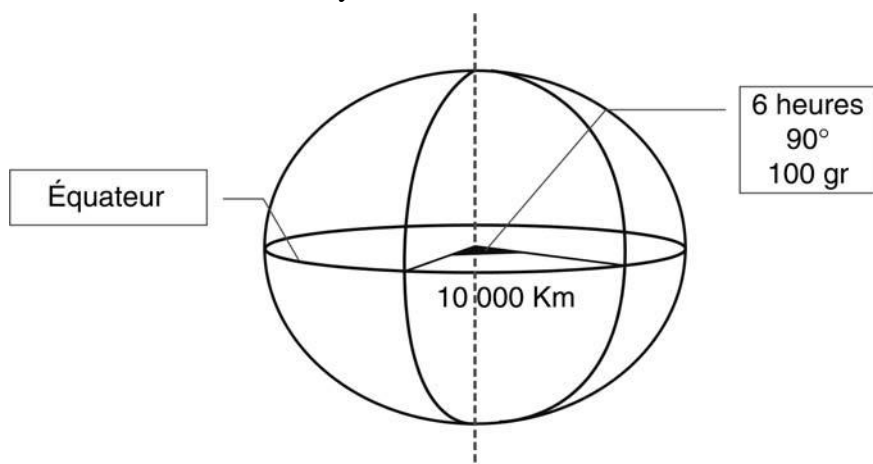


Fig.1 Relation temps, angle et distance (Source ; Bouron, P)

| | | |
|--|--|--|
| 1 grade \Leftrightarrow 100 km | 1 cgr \Leftrightarrow 1 km | 1 dmgr \Leftrightarrow 10 m |
| 1 degré \Leftrightarrow 111 km | 1' \Leftrightarrow 1,85 km (mille marin) | 1'' \Leftrightarrow 30 m |
| 1 heure \Leftrightarrow 15° \Leftrightarrow 1 667 km | 1 minute \Leftrightarrow 15' \Leftrightarrow 28 km | 1 seconde \Leftrightarrow 15'' = 450 m |

Tableau 1 : Relation angle distance

3. De la terre à la carte : Trois points seront abordés :

- La forme de la terre,
- Les coordonnées géographiques,
- Les projections cartographiques

3.1 La forme de la terre, champ de gravité et géodésie.

La Géodésie : science de l'étude de la forme de la terre : décrit la géométrie de cette forme et ses relations avec la pesanteur. En allant du plus simple au plus complexe, la Terre peut être représentée par :

3.1.1 La terre : Sphère Une sphère est basée sur un cercle, La supposition que la terre est une sphère est possible pour les cartes à petite échelle (inférieure à 1 : 5 000 000).

3.1.2 La Terre : Ellipsoïde de révolution : Surface mathématique proche de la terre, abstraction faite du relief, La forme d'une ellipse est définie par deux rayons. Le rayon le plus long est appelé demi-grand axe et le plus court, demi-petit axe.

3.1.3 La terre : Géoïde : C'est une surface équipotentielle de pesanteur. Ce pourrait être le niveau des océans s'ils étaient au repos (ni vagues, ni marées, ni courants) et s'ils n'étaient déformés ni par les différences de pression atmosphérique, ni par les différences de densité de l'eau. Il n'est pas défini par une fonction mathématique comme l'ellipsoïde, mais observé point par point. La surface du géoïde est irrégulière et ne se confond pas avec l'ellipsoïde de révolution (100 m maxi).

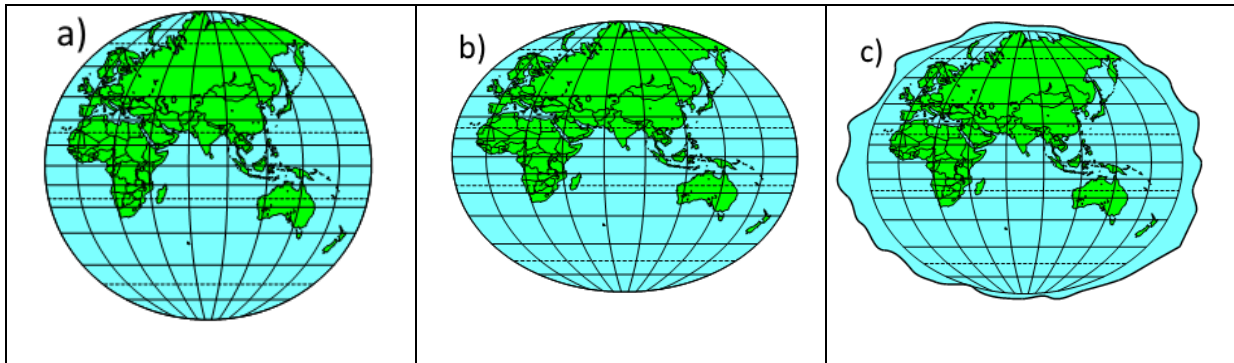
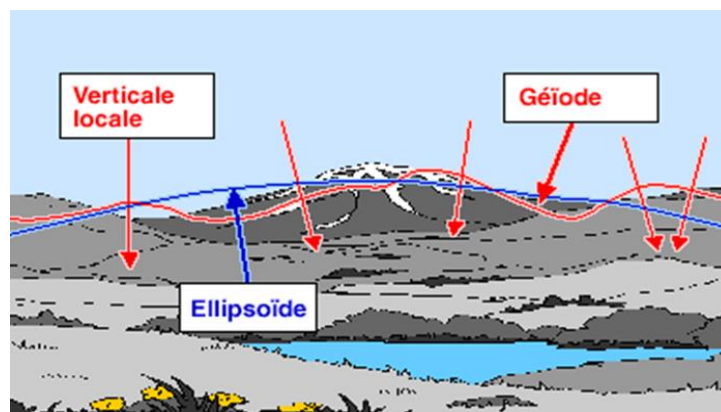
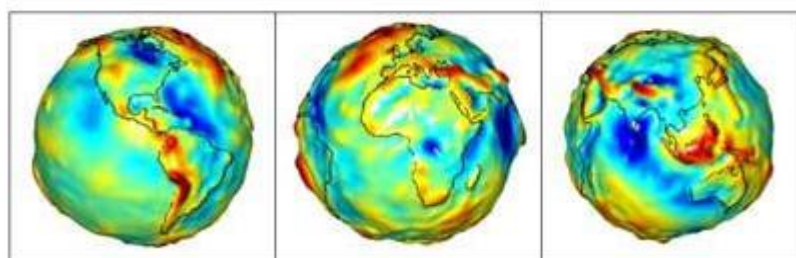


Fig 2. a, b, c Modélisation de la terre (source CERTU)



REPRÉSENTATION DU GÉOÏDE TERRESTRE



Représentation du géoïde terrestre issue du modèle GGM01 (l'échelle des couleurs s'étend de -70 mgal en bleu foncé, à +70 mgal en rouge foncé)

Hauteurs de géoïde en mètres

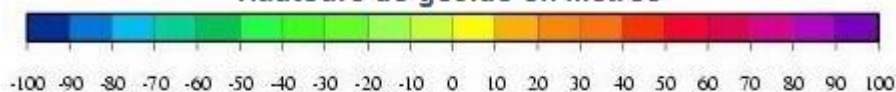


Fig. 3: Représentation du géoïde terrestre (Source ; Géowiki.fr)

3.2 Les systèmes géodésiques

Toute mesure de position sur la Terre se fait par rapport à des lignes imaginaires : la longitude et la latitude. Un système géodésique définit l'endroit précis où ces lignes passent sur la Terre. Si la Terre était homogène et immobile, sa surface serait une équipotentielle de gravité parfaitement sphérique. Du fait de sa rotation, sa surface est un ellipsoïde aplati aux deux pôles. En faisant abstraction des irrégularités de la surface terrestre, on définit mathématiquement un ellipsoïde de référence caractérisée par la valeur de son demi grand axe et le rapport grand axe sur petit axe.

Plusieurs ellipsoïdes de caractéristiques différentes ont été utilisés dans le cours des temps par les divers organismes cartographiques nationaux. Chaque réseau géodésique national ou international est établi à partir d'un point fondamental tel qu'en ce point les deux surfaces, géoïde et ellipsoïde de référence, sont amenées à être tangentes, par hypothèse.

A titre d'exemple: L'ellipsoïde de Hayford (1909)

demi-grand axe: $a = 6\,378\,388$ m

demi-petit axe: $b = 6\,356\,912$ m

aplatissement $(a - b) / a = 1/297$

circonférence méridienne 40 008,4 km

circonférence équatoriale 40 075,9 km

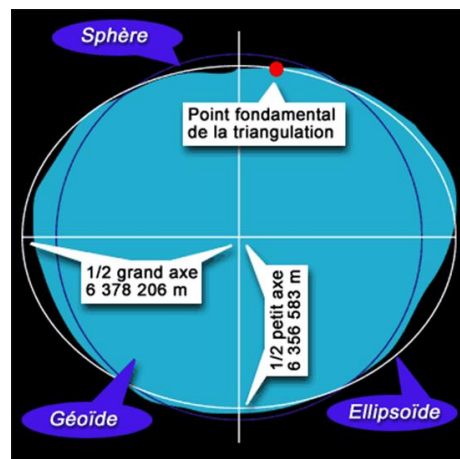


Fig.4 géoïde et ellipsoïde

Avec l'avènement du GPS, un système géodésique valable mondialement a été mis au point : l'ellipsoïde WGS 84 (World Geodesic System of 1984). On distingue deux grandes familles des systèmes géodésiques :

3.2.1 Les systèmes locaux :

- hérités des modes de détermination passés
- concernent une région ou un pays
- peu précis
- dont les réalisations ne sont plus toujours maintenues.

3.2.2 Les systèmes globaux : plus récents , plus précis, concernent la planète, correspondant généralement à des déterminations spatiales.

Il existe plusieurs ellipsoïdes en usage, dont les plus courants sont :

Clarke 1866
 Clarke 1880 anglais
 Clarke 1880 IGN
 Bessel
 Airy
 Hayford 1909
 International 1924
 WGS 66
 International 1967
 WGS 72
 IAG-GRS80
 WGS 84
 NAD27
 NAD83

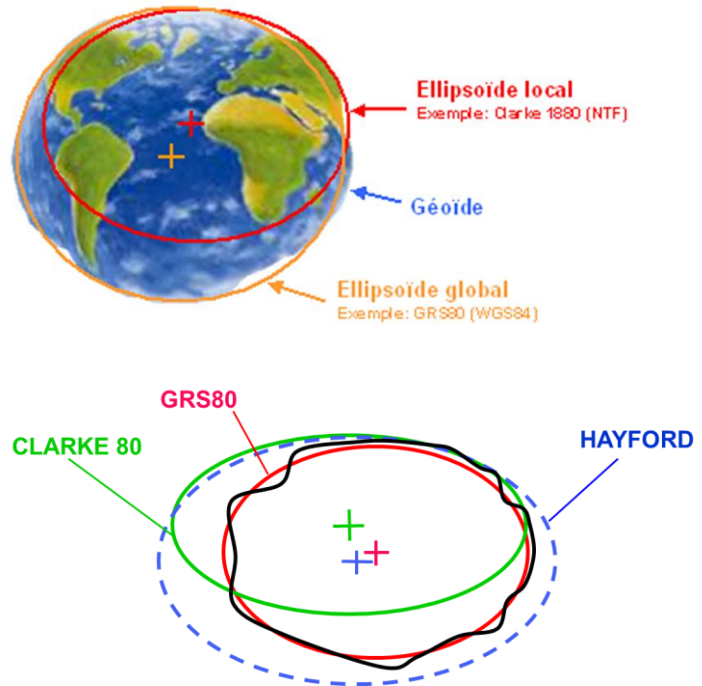


Fig. 5 Quelques exemples sur les ellipsoïdes

3.3 Les systèmes de coordonnées :

3.3.1 Système de coordonnées géographiques : utilise une surface sphérique en trois dimensions pour définir des emplacements sur la terre, constitué par un réseau de lignes orthogonales :

- Parallèles : lignes circulaires parallèles à l'équateur
- Méridiens : sur sphère terrestre : grands cercles passant par les 2 pôles ; sur ellipsoïde : ellipses passant par les 2 pôles.

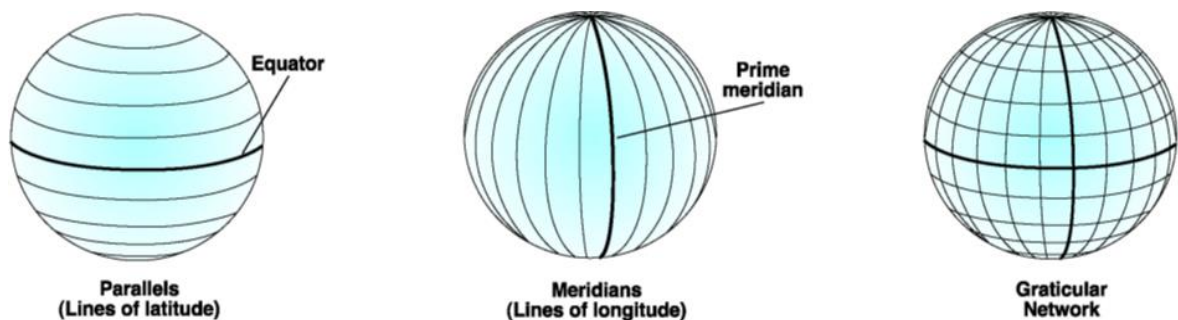


Fig. 6 : Réseaux graticulaire (méridiens et parallèles)

Un point est référencé d'après ses valeurs de longitude et de latitude. Les valeurs de latitude et de longitude sont mesurées en degrés décimaux ou en degrés, minutes et secondes (DMS).

Les valeurs de latitude sont mesurées par rapport à l'équateur et sont comprises entre -90° au

pôle Sud et $+90^\circ$ au pôle Nord. Les valeurs de longitude sont mesurées par rapport au méridien principal Greenwich. Elles vont de -180° lorsqu'on va vers l'ouest jusqu'à 180° lorsqu'on va vers l'est.

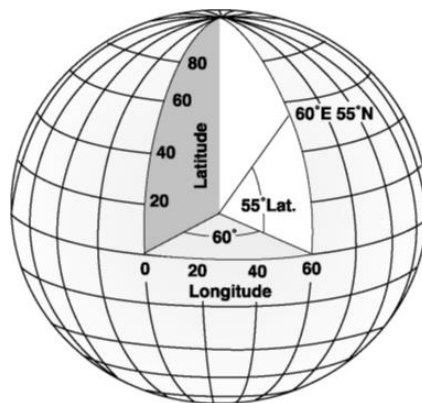


Fig. 7 Longitude et latitude

3.3.2 Un système de coordonnées projetées : se définit sur une surface plane, à deux dimensions, possède des longueurs, des angles et des surfaces constantes dans les deux dimensions. Un système de coordonnées projetées est toujours basé sur un système de coordonnées géographiques lui même basé sur une sphère ou un ellipsoïde. Dans un système de coordonnées projetées, des emplacements sont identifiés par des coordonnées x, y sur une grille, dont l'origine est située au centre de cette grille. Ces deux valeurs sont appelées la coordonnée x et la coordonnée y . Avec cette notation, les coordonnées à l'origine sont $x = 0$ et $y = 0$.

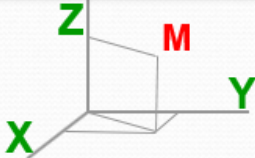
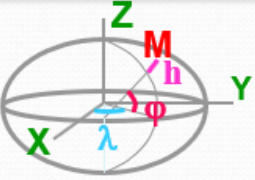
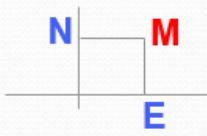
| | | |
|--|---|---|
| <p><u>CARTESIENNES</u></p> <p>x, y, z</p> |  | <p>* SYSTEME DE REFERENCE</p> |
| <p><u>GEOGRAPHIQUES</u></p> <ul style="list-style-type: none"> •Latitude : φ •Longitude : λ •Hauteur ellipsoïdale : h |  | <p>* SYSTEME DE REFERENCE</p> <p>* ELLIPSOIDE</p> |
| <p><u>PLANES</u></p> <p>E, N</p> |  | <p>* SYSTEME DE REFERENCE</p> <p>* ELLIPSOIDE</p> <p>* PROJECTION</p> |

Fig. 8 Les systèmes de coordonnées

4. Les projections cartographiques :

Que la terre soit considérée comme une sphère ou un ellipsoïde, vous devez transformer sa surface en trois dimensions pour créer une feuille de carte plane. Cette transformation mathématique est généralement appelée projection cartographique.

Le terme projection, au sens plus général, évoque le moyen de correspondance analytique entre les points de la surface à représenter (ellipsoïde terrestre) et les points homologues du plan, correspondance qui doit être continue et biunivoque.

« Transposition d'une portion de l'ellipsoïde de référence géodésique représentant la surface terrestre, sur une surface plane, à l'aide d'un modèle mathématique. » OLF, 1993

4.1 L'indicatrice de TISSOT :

Toutes les solutions envisagées introduisent des déformations qui altèrent tout ou partie des éléments de la surface à représenter : longueurs, angles, surfaces.

- Dans certains cas les altérations angulaires peuvent être minimisées.
- Dans certains cas les altérations de surfaces peuvent être minimisées.
- Dans aucun cas les déformations linéaires ne peuvent être éliminées.

Considérons un cercle infiniment petit de la surface sphérique; sa transformée sur le plan n'est pas un cercle identique (sauf en un point ou sur une ligne privilégiée : "centre de projection") mais une ellipse infiniment petite que l'on appelle INDICATRICE DE TISSOT.

4.2 Les projections selon le type de représentation :

4.2.1 Les projections conformes : Ces systèmes conservent les angles élémentaires formés par les directions quelconques.

4.2.2 Les projections équivalentes : Ces systèmes conservent les surfaces ou, plus exactement, les rapports des surfaces de la Terre à la carte

4.2.3 Les projections aphyllactiques : Ces systèmes ne conservent ni les angles ni les distances.

4.3 Projections selon leur forme :

4.3.1 La projection conique : La projection conique la plus simple est tangente au globe le long d'une ligne de latitude. Cette ligne est appelée le parallèle standard. Les méridiens sont projetés sur la surface conique, et se rejoignent au sommet, ou point, du cône. Les lignes parallèles de latitude sont projetées sur le cône en anneaux. Le cône est ensuite « découpé » le

long d'un méridien pour obtenir la projection conique finale, qui a des lignes droites convergentes pour les méridiens et des arcs concentriques pour les parallèles.

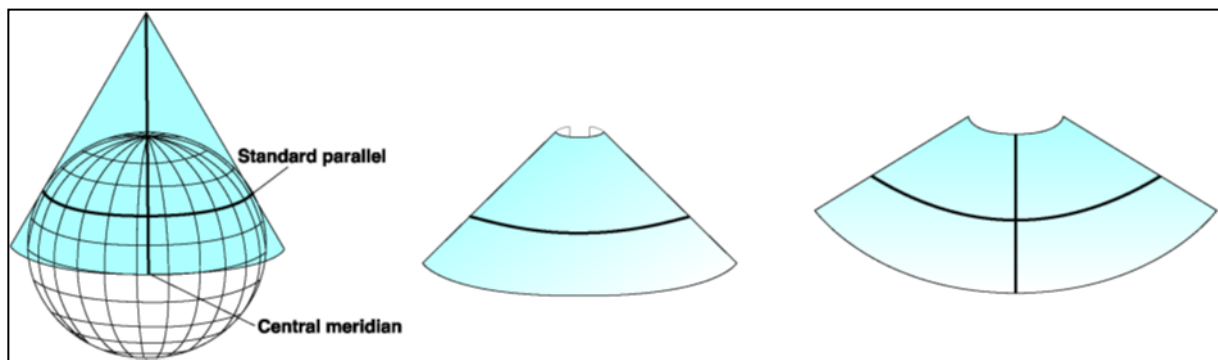


Fig. 9 Projection conique (source, ESRI)

4.3.2 Projections cylindriques : Les projections cylindriques peuvent également avoir des cas tangents ou sécants. La projection de Mercator est l'une des projections cylindriques les plus courantes, et l'équateur constitue généralement sa ligne de tangence. Les méridiens sont projetés de façon géométrique sur la surface cylindrique, et les parallèles sont projetés de façon mathématique. Cela produit des angles de carroyage de 90 degrés. Le cylindre est « découpé » le long d'un méridien pour obtenir la projection cylindrique. Les méridiens sont également espacés, alors que l'espacement entre les lignes parallèles de latitude augmente vers les pôles. Cette projection est conforme et affiche la vraie direction le long des lignes droites.

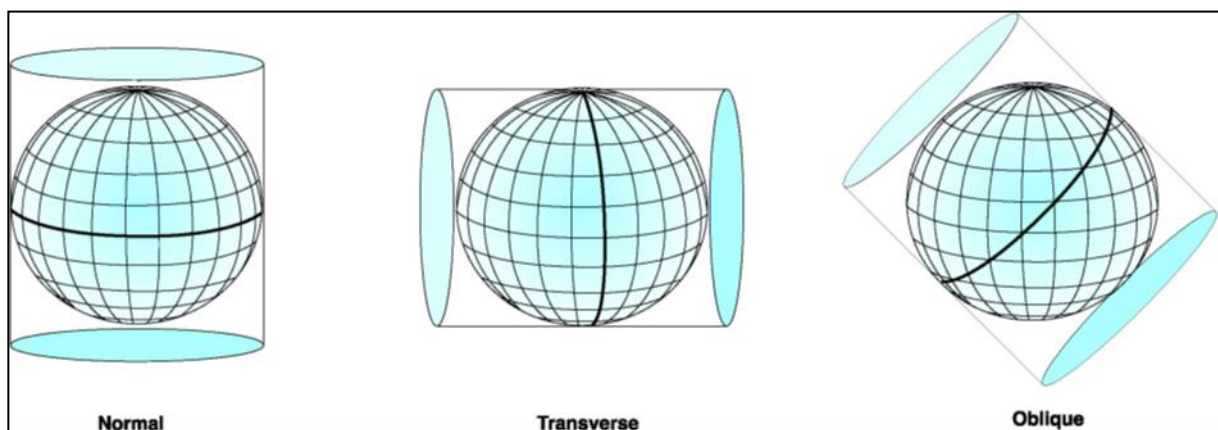


Fig. 10 Projection cylindrique (source, ESRI)

4.3.3 Projections planaires : Les projections planaires projettent les données cartographiques sur une surface plane touchant le globe. Ce type de projection est généralement tangent au globe en un point mais peut être également sécant. Le point de contact peut être le pôle Nord, le pôle Sud, un point sur l'équateur ou tout autre point intermédiaire. Ce point définit l'aspect et le point central de la projection. Les aspects polaires constituent la forme la plus simple.

Les parallèles de latitude sont des cercles concentriques centrés sur le pôle, et les méridiens sont des lignes droites qui s'entrecroisent au pôle avec des angles d'orientation vrais.

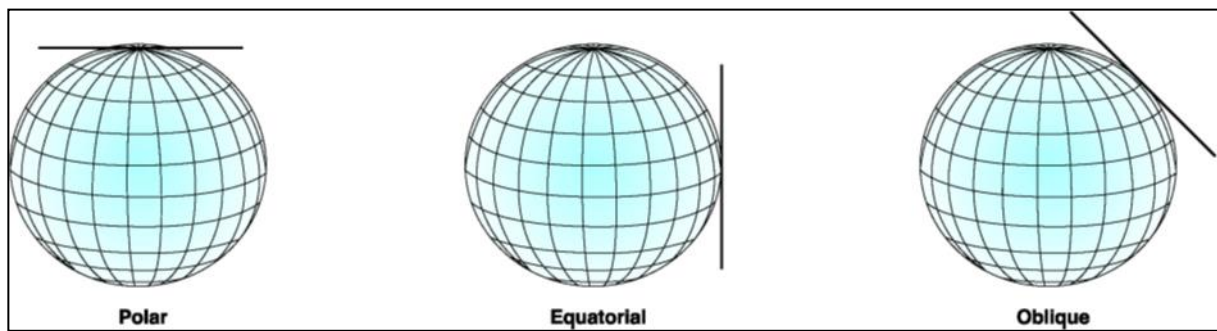


Fig. 11 Projection planaire (source, ESRI)

5. Géoréférencement

Un géoréférencement est une action qui consiste à relier un objet et les données, les géoréférencées, qui y sont associées à sa position dans l'espace par rapport à un système de coordonnées géographiques.

Le géoréférencement est la technique de positionnement spatial d'une entité dans un cadre unique et une situation géographique bien définie dans un système de coordonnées et de références spécifiques. Il consiste en une opération courante dans le système d'information géographique (SIG) pour les deux objets raster (image bitmap pixels) à des objets vectoriels (points, lignes, polygones et polygones qui représentent des objets physiques).

Le géoréférencement est un aspect fondamental dans l'analyse des données géospatiales, il est la base de l'emplacement correct de l'information dans la carte et, par conséquent, la fusion et la comparaison des données provenant de différents capteurs sur différents emplacements spatiaux et temporels adéquats. Par exemple, les deux entités géoréférencées dans différents systèmes de coordonnées peuvent être combinées après transformation affine appropriée (soit au système de coordonnées du premier objet, le deuxième puits).

Il existe deux méthodes principales de géoréférencement :

- Le géoréférencement orbital, quelles sources d'erreurs géométriques familières (la courbure de la Terre, la distorsion panoramique, modèle de rotation de la Terre, etc.) et les transformations inverses pour corriger ces erreurs systématiques intrinsèques et automatisées sont appliqués. Il a le grand avantage de ne pas nécessiter l'intervention humaine une fois qu'il est mis en œuvre, mais peut conduire à des erreurs importantes dans les coordonnées des

images satellite si le système de positionnement n'est pas assez précis (le problème a diminué avec l'avènement des systèmes de navigation modernes).

- Le géoréférencement par des points de contrôle, qui à partir d'un ensemble de points clairement identifiés dans l'image et leurs coordonnées sont des fonctions connues (linéaire, quadratique) de transformation qui correspondent le mieux aux calculs de ces points. Pour que ce géoréférencement soit satisfaisant, il est nécessaire de choisir de manière appropriée des points de contrôle (en nombre, emplacement et distribution). Il est donc un processus manuel dans lequel l'intervention humaine est nécessaire. Il offre une plus grande précision dans le travail dans les zones où il est possible d'identifier des points bien connus.

Chapitre II : notion de base d'un S.I.G

I. Les définitions et fonction d'un S.I.G

Le terme Système d'Information Géographique a été utilisé pour la première fois par R. F. Tomlinson, quand il a installé un système d'informations, se référant à un espace, pour le compte du Canada en 1967 (CGIS). A travers cette dénomination, il réussissait pour la première fois l'orientation vers une nouvelle technologie : à savoir l'utilisation de l'ordinateur pour le traitement des données se référant à un espace.

Les définitions que divers auteurs et organismes donnent des SIG sont assez voisines (Didon, 1990) :

- En 1979, Dueker propose une définition assez précise du concept de SIG comme "Un type particulier de système d'information dont la base de données contient des informations reliées à des entités physiques, des activités ou des événements localisés et assimilables aux formes géométriques de points, de lignes et de zones. Un SIG gère les informations spécifiques à ces points, lignes et zones pour extraire les données requises afin de réaliser des recherches et des analyses spécialisées." Cette première définition montre bien les éléments géométriques de base qui peuvent être utilisés.
- D'après Burrough (1986), il s'agit « d'un ensemble puissant d'outil pour rassembler, stocker, extraire à volonté et visualiser des données spatiales du monde réel pour un ensemble particulier d'objectifs » ;
- En 1988, une définition donnée par Dickinson et Calkins reprend le SIG comme un système à plusieurs composantes : "Les SIG comportent trois types de composantes : technologiques (matériel et logiciel), informatives (bases de données géographiques et associées) et infrastructurelles (personnel, installations, services de support)." Cette définition donne une approche systémique du concept de SIG. Il ne s'agit pas seulement d'outils (logiciels), mais d'un système complexe.

- La société Française de Photogrammétrie et de Télédétection (1989) le définit comme étant « un système informatique permettant, à partir de diverses sources, de rassembler, d'organiser, de gérer, d'analyser, de combiner, d'élaborer, et de présenter des informations localisées géographiquement, contribuant notamment à la gestion de l'espace ».

De façon générale un SIG peut être défini comme un système informatique de gestion et de traitement d'informations localisées. Un SIG peut être considéré comme un modèle du monde réel (Fig12) qui permet d'élaborer, de tester et de choisir des scénarios d'évolution pour l'avenir.

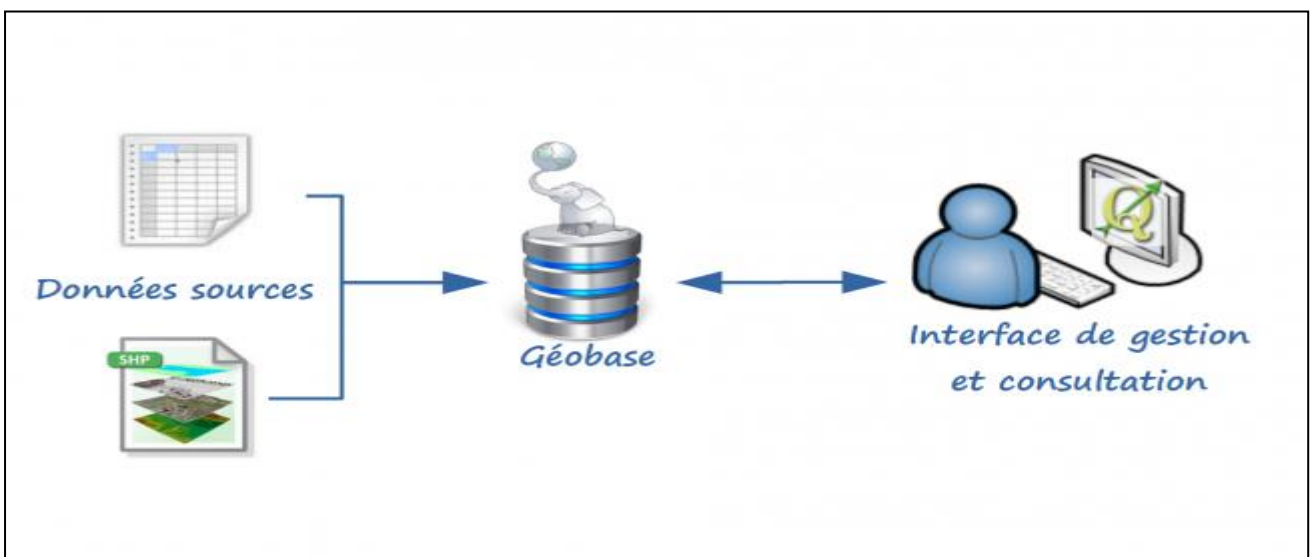


Figure 12 : Schéma d'un SIG (source :Cartodia.fr)

II. Historique

▣ Période des précurseurs (années 60)

▣ Expérimentations (années 70)

- Arrivée des unités graphiques,
- Informatique des spécialités,
- Apparition des premières compagnies de logiciels de SIG (ESRI 1969, Intergraph, Computer.),
- Applications modèle (Maryland GIS 1973).

▣ Maturité (années 80)

- Développement des applications,
- Diffusion des outils (ex : ArcInfo),

- Apparition des premiers enjeux méthodologiques,
- Analyse spatiale, structuration des données, intégration raster-vecteur, interfaces,...
- Essor de la recherche,
- Apparition des premières revues et conférences, de réseaux internationaux,
- Emergence d'une communauté d'utilisateur.
- Mise en place des programmes d'enseignement

▣ **Diffusion (années 90)**

- Généralisation des applications (gouvernement, collectivités locales, villes, gestionnaires de réseaux urbains, producteurs de cartes et de plan,...),
- Élargissement des thématiques (environnement, médecine, géo-marketing, démographie, tourisme, transport...),
- Multiplication des outils de spécialités (ArcInfo, Intergraph,...), grand public (MapInfo, ArcView, Géomédia,...),
- Apparition d'un marché commercial (croissance forte du marché, 15% par an, le nombre de licences se compte en centaines de milliers),
- Apparition de client internet,

III. Composants d'un SIG

Le cœur d'un SIG est constitué (figure 2) par la base des données géographiques (BDG) composée de deux composants principaux (Collet, 1992).

- Une base de données spatiales décrivant les objets spatiaux (couche géologique, limites de nappes, limites de bassins versants, ouvrages d'eau souterraine...);
- Une base de données alphanumériques (attributs) (figure3) définissant les caractéristiques thématiques (faciès lithologique, profondeur de l'eau, cote de substratum, productivité des ouvrages ...) des objets spatiaux.

Autour de cette base de données gravite un ensemble de systèmes informatiques avec lesquels elle est en interaction permanente. Chaque système a une fonction précise au sein du SIG (Didon 1990). On distingue notamment :

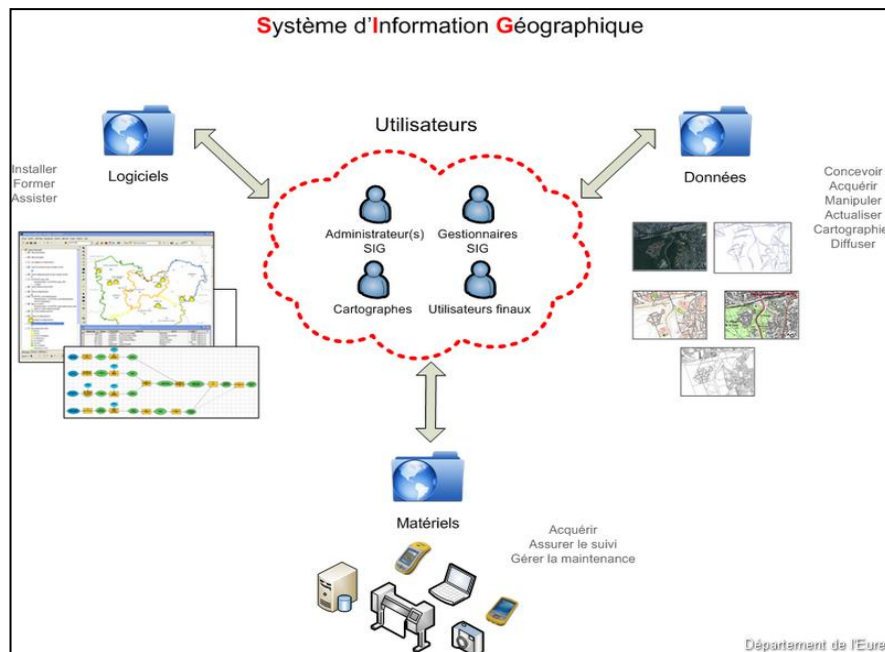


Fig. 12 : les composantes d'un système d'information géographique


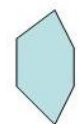

| Données Géographiques | | | | | | | |
|------------------------------------|---|---|---|----------|---------|---------|------|
| Données a références géographiques | | | Données Alpha-Numériques | | | | |
| Localisation en X, Y | | Localisation topologique (relationnelle) | | Variable | Classes | Valeurs | noms |
| Point | Ligne | Surface | Grille | Réseau | | | |
| * |  |  |  | | | | |

Tableau 2 : Données manipulées par un SIG

a) Le système de saisie numérique

Ce système permet de saisir les documents à caractère spatial (Figure 4) (telles que les cartes topographiques, géologiques...) et de convertir l'information analogique en une information numérique.

Un des moyens de saisie d'un document cartographique par le SIG, est l'utilisation de la table à digitaliser.

Les bases de données alphanumériques (attributs) peuvent être directement saisies dans des nouvelles tables du SIG ou importées à partir d'autres logiciels (Excel, Access, Dbase, etc...).

b) Le système de traitement d'images

Les images qui ne peuvent être digitalisées (photo aériennes, satellitaires, etc...) peuvent être scannées et calées attribution de coordonnées (x, y) à chaque point de l'image dans le type de projection correspondant à la zone étudiée.

c) Le système de gestion et de la base de données

Un SIG contient non seulement un SGBD traditionnel (gestion des données thématiques), mais aussi une variété d'outils capables de gérer à la fois les dimensions thématique et spatiale de l'information.

Par exemple le SGBD permet de répondre à des requêtes formulées par les gestionnaires des ressources en eau souterraine (sélection des données relatives à un secteur donné, combinaisons mathématiques plus ou moins compliquées (profondeur d'eau, profondeur du substratum...) et de mettre des résultats dans des tableaux, graphiques, cartes...

Le système de gestion de la base de données a une liaison bidirectionnelle avec la base de données géographique (spatiale). Ainsi, il prélève à la fois de l'information de la BDG et la complète à l'aide des résultats des analyses effectuées.

d) Le système d'analyse statistique

Ce système permet de faire tous les traitements statistiques classiques des données et des procédures statistiques d'analyse de la dimension spatiale.

e) Le système d'analyse spatiale

L'analyse spatiale de l'information constitue l'outil le plus puissant d'un SIG. Elle constitue une extension des capacités d'interrogation des bases de données traditionnelles, en prenant en compte la localisation géographique des observations.

Ce système permet par exemple de fusionner plusieurs objets selon des critères et des conditions fixés par l'utilisateur (des zones de même faciès géologique par exemple), et de créer ainsi de nouvelles tables plus synthétiques et plus facilement exploitables (Figure4).

Le système d'analyse spatiale a une liaison bidirectionnelle avec la base de données géographiques.

f) Le système de représentation cartographique

Ce système permet de sélectionner des éléments de la BDG et de les représenter cartographiquement à l'écran de l'ordinateur ou à l'imprimante.

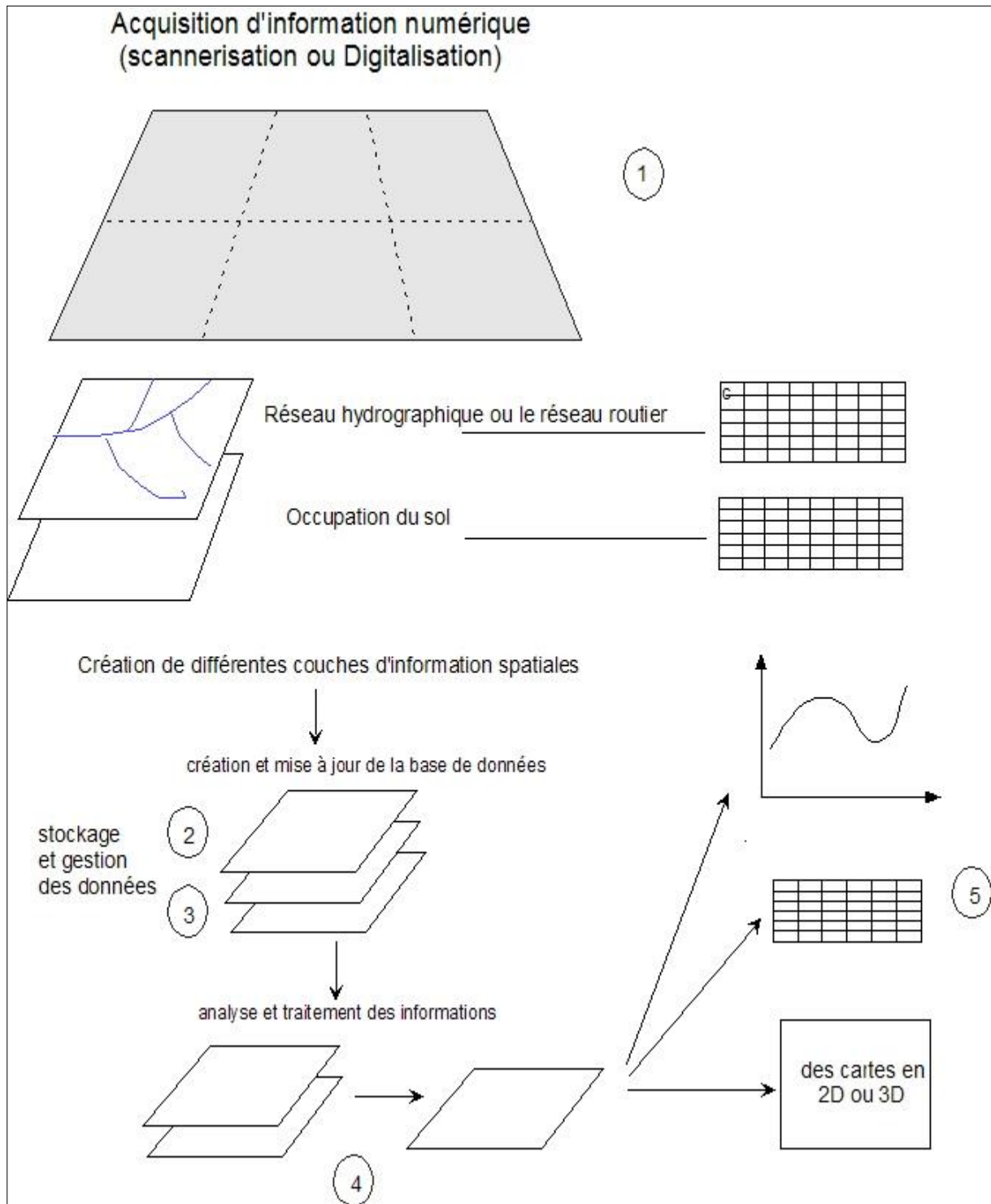


Fig. 13: Principales fonctions d'un SIG

Résumé (Figure5):

Un SIG combine des possibilités de représentation graphique d'un logiciel de Dessin Assistée par Ordinateur (D.A.O), avec les capacités de manipulation des données d'un Système de Gestion de Base de Données (S.G.B.D).

Nous assistons aussi, par le biais des SIG à une combinaison de la cartographie et de la télédétection. Ce fusionnement d'informations permet ainsi de se rapprocher à une meilleure « réalité de terrain ».

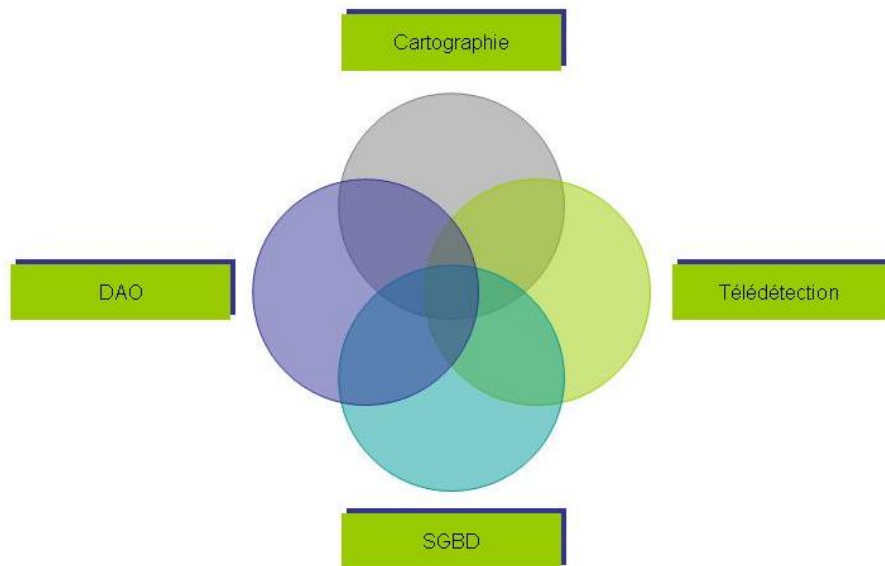


Fig 14. Relation établie par le SIG entre : télédétection, système de gestion de base de données, dessin assister par ordinateur et cartographie automatique

IV. Mode de représentation d'un SIG

Il existe deux approches fondamentales pour représenter l'espace géographique dans un système d'information géographique ; le mode vectoriel et le mode matriciel. Ces deux modes sont complémentaires et permettant de créer des modèles d'une qualité supérieure.

1) Mode raster

Le mode raster correspond à une division régulière (Figure 6) de l'espace étudié en cellules rectangulaires carrées (pixels). Il est fortement lié à la notion d'image. Les images satellitaires en sont des exemples.

Chaque pixel est référencé en ligne et en colonne et contient une valeur correspond à une grandeur numérique (niveau d'eau, perméabilité teneur en nitrates...) ou alphanumérique (dans ce cas on lui attribue un code (Figure 7) correspond à un attribut descriptif). La résolution de ce type de SIG (taille occupée par un pixel sur terrain) correspond à la taille des plus petits objets que l'on pourra identifier.

Ce mode de représentation est très adapté pour effectuer des calculs entre pixels de mêmes dimensions ayant les mêmes coordonnées et appartenant à des couches différentes du SIG. C'est le cas par exemple de la carte de vulnérabilité d'un aquifère élaborée à partir de plusieurs couches d'information relatives au sol, à la recharge et à la zone non saturée de la nappe.

Un inconvénient majeur de ce mode de représentation est qu'il exige de larges volumes pour le stockage des données, ce qui ralentit énormément leur manipulation sur les PC. Les dimensions des fichiers peuvent être cependant considérablement réduits à l'aide des méthodes de compaction.

2) Le Mode vecteur

Le mode vecteur permet la représentation des objets dans un espace continu (non discrétisé) (Figure 6) : les objets et leurs limites sont localisés avec précision dans un référentiel géographique ou cartésien. Cette structure de données est liée à la notion de carte.

Les objets et leurs limites sont digitalisés et leur représentation se fait sous trois formes de base : les points (ex : puits, forages, sources, sondages électriques, sources de pollution...), les polygones (ex : réseau hydrographique, réseau routier...) et les polygones (ex : surface d'une formation géologique, d'un aquifère, d'un périmètre irrigué..).

Le repère utilisé pour localiser les objets peut être géographique (longitude, latitude) ou cartésien (système Lambert). Ainsi, un point est désigné par ses coordonnées et une ligne continue est codée de manière approchée par ligne brisée (suite de points repérés par leurs coordonnées).

Le mode vecteur a l'avantage de permettre une représentation plus conforme au mode réel. Le SIG est constitué par la superposition, la visualisation et l'impression de tous les objets existants, par exemple les réseaux hydrographique et routier, les courbes de niveau, les limites des couches géologiques, la situation des ouvrages d'eau souterraines...). La sortie finale des documents est généralement d'une grande qualité et pourra se faire à l'échelle voulue.

Ce mode ne permet pas cependant de faire des calculs numériques entre les différentes couches d'information d'un SIG. Les croisements entre les différentes couches d'information sont délicats, car ils font appel à des algorithmes complexes et nécessitent une typologie parfaite. Des erreurs comme un polygone mal fermé ou un arc dupliqué (limite entre deux couches géologiques par exemple) surgissent fréquemment, sont difficiles à détecter et altèrent la typologie de la couche traitée.

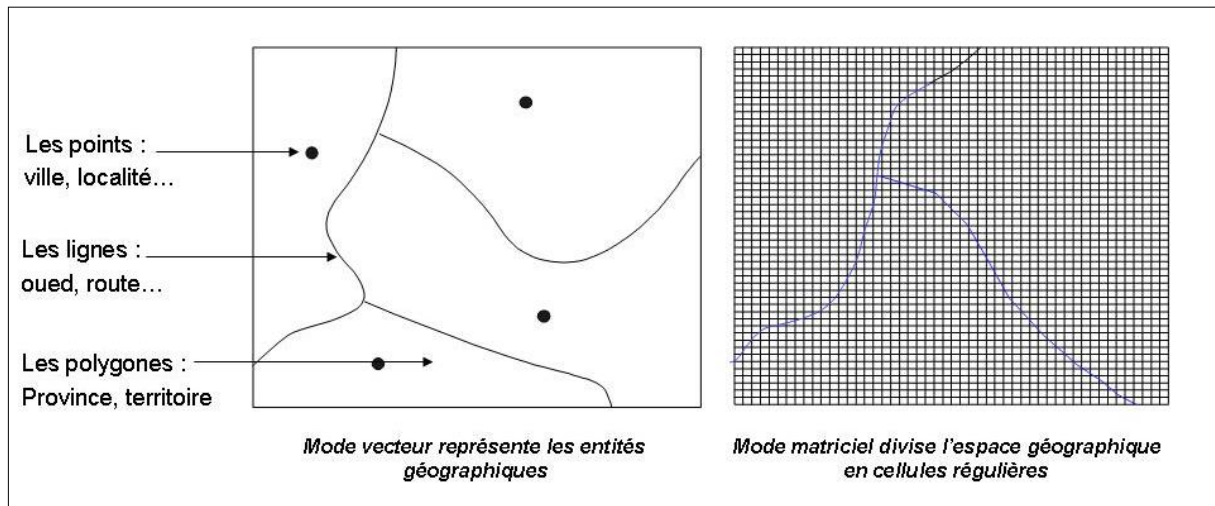


Fig.15 : la représentation en mode vecteur et en mode raster

3) Combinaison des modes vecteur et raster

Loin de s'opposer, les deux modes de représentation (vecteur et raster) d'un SIG se complètent dans leur utilité pour représenter et modéliser le monde réel.

Si tous les SIG comportent un système de gestion de bases de données, certains ne seront à même de ne traiter que des données du type raster, d'autre n'utilisent que des données de types vecteur.

La nouvelle génération des SIG disponibles actuellement sur le marché dispose des algorithmes de conversion (Figure 8) nécessaires et permettent le passage du mode vecteur en mode raster et inversement (ArcView par exemple). La tendance sous ses deux modes : vecteur et raster.

Chapitre III : Acquisition de donnée

1. Introduction

L'acquisition des données pour un SIG ne consiste pas uniquement à leur introduction dans une base de données, mais aussi à les codifier. Cette codification doit considérer le format et la structure des données utilisés par le logiciel envisagé. En effet, tout objet à saisir doit être nommé ou codifié. Ainsi, il peut être distingué des autres et appelé facilement chaque fois que c'est nécessaire. En principe, l'acquisition des données se fait en trois phases (Figure7) :

- Saisie des données spatiales,
- Saisie des attributs,
- Lien entre les données spatiales et leurs attributs.

La saisie des données est l'étape la plus lente et la plus onéreuse aussi. Cependant, si la saisie est réalisée d'une façon adéquate et selon des standards spécifiés par le logiciel (unité de travail, échelle, choix du système de projection, etc...), toute étape ultérieure peut être exécutée facilement et en un temps très court. Pour entamer la procédure de saisie, il est nécessaire de disposer des données. Ces données proviennent de sources variées qui englobent entre autres :

- Base de données existantes,
- Tableaux, listes de données numériques ou alphanumériques, etc,
- Observations terrain par moyen d'instruments topographiques (GPS, carnet électronique, etc.),
- Photographie arienne,
- Images satellitaires,
- Cartes existantes,
- Tout document graphique,

Par échantillonnage (aléatoire, systématique, stratifié, etc..).

2. Saisie des données spatiales

a. Données existantes

Ces données concernant surtout les observations topographiques, les bases de données existantes, des fichiers de données numériques provenant de différents logiciels et des listes et tableaux de données numériques et/ou alphanumériques. Ces données pouvant être introduites dans la base des données d'un SIG si leur format est compatible avec le format des données traitées par le logiciel.

b. Numérisation

Cette opération consiste à numériser toutes les entités spatiales. Ainsi, selon le type de données à numériser, l'opérateur doit choisir entre l'utilisation d'une table à numériser et un instrument à balayage électronique (scanner) (Figure 7). Le principe général de numérisation consiste à mesurer, dans un système d'axes, tous les détails du document à saisir.

c. Conversion

Quelque soit la méthode utilisée, l'opérateur d'un SIG peut avoir besoin de données en mode vecteur ou de données raster qu'une conversion d'un mode à l'autre peut être nécessaire. Cette conversion est réalisée par un module quelques fois incorporé dans le logiciel utilisé ; certains logiciels n'offrent pas cette facilité. Par conséquent, l'opérateur peut réaliser le programme de conversion en se basant sur les divers algorithmes répondant à cet objectif.

3. Saisie les attributs

Les attributs sont caractérisés par leur aspect non spatial (Figure 17). Par exemple, une zone peut être définie spatialement par sa limite, enregistrée dans la base par les coordonnées des points infiniment voisins qui la forment (mode vecteur) ou par la position et les valeurs des pixels se trouvant sur l'étendue de cette zone (mode raster). Cependant, cette zone peut être caractérisée par une culture spécifique, un type de sol bien défini, un type d'irrigation particulier, un ou plusieurs propriétaires, un type de terrain donné, etc. Ces données descriptives constituent les attributs. Ainsi, la saisie de ces éléments est réalisée parallèlement à la saisie des données spatiales ou plus tard en utilisant le système de gestion de la base des données. De même, chaque attribut est décrit par un identificateur qui sert à le distinguer des autres attributs ou à l'extraire lorsque c'est nécessaire.

4. Lien entre données spatiales et attributs

L'utilisation d'une structure de données adéquate facilite la gestion et la mise à jour de ces données. Par conséquent, l'utilisation de codes et d'identificateurs uniques rend le lien efficace entre les deux types de données (Figure 17). Ce lien sert à faire correspondre chaque entité graphique aux différents attributs qui lui sont associés. Ainsi, chaque objet est décrit dans la base de données d'une manière claire et détaillée. Cette description peut inclure aussi les objets voisins. De même, une description topologique des différentes relations existantes entre les objets représentés et entre ces objets et leurs attributs, constitue le lien fondamental des données spatiales et non spatiales. La majorité des SIG actuels incorporent un système de gestion de base de données utilisant une structure topologique.

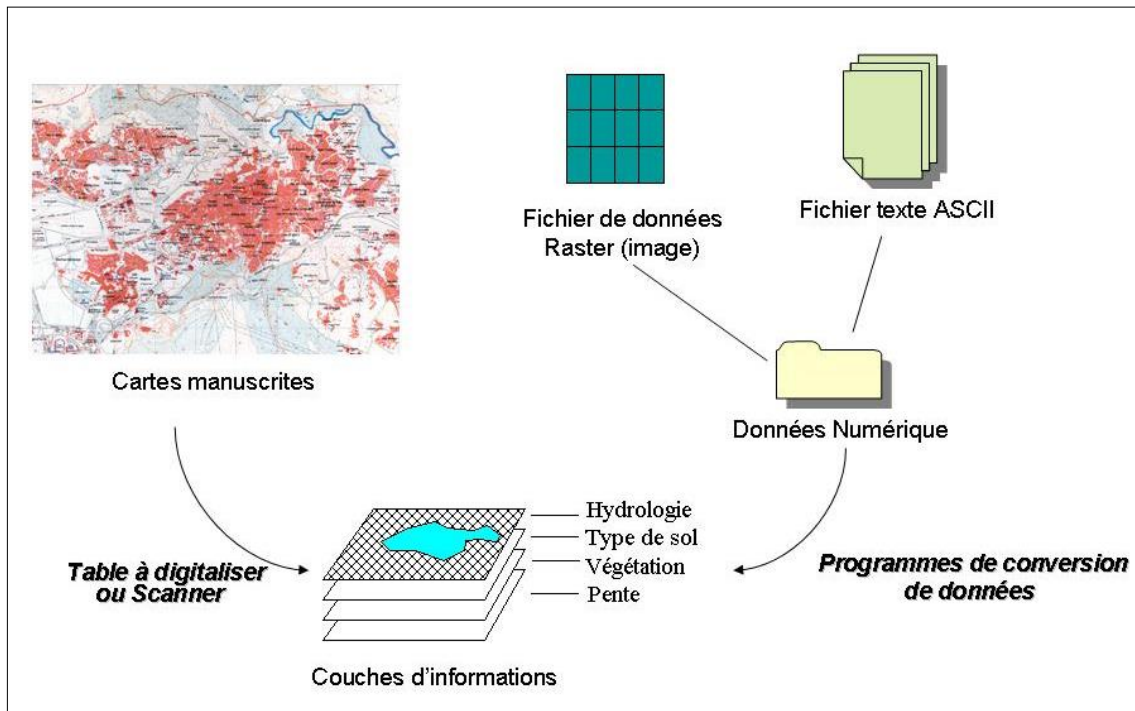


Fig. 16 Acquisition des données pour un SIG

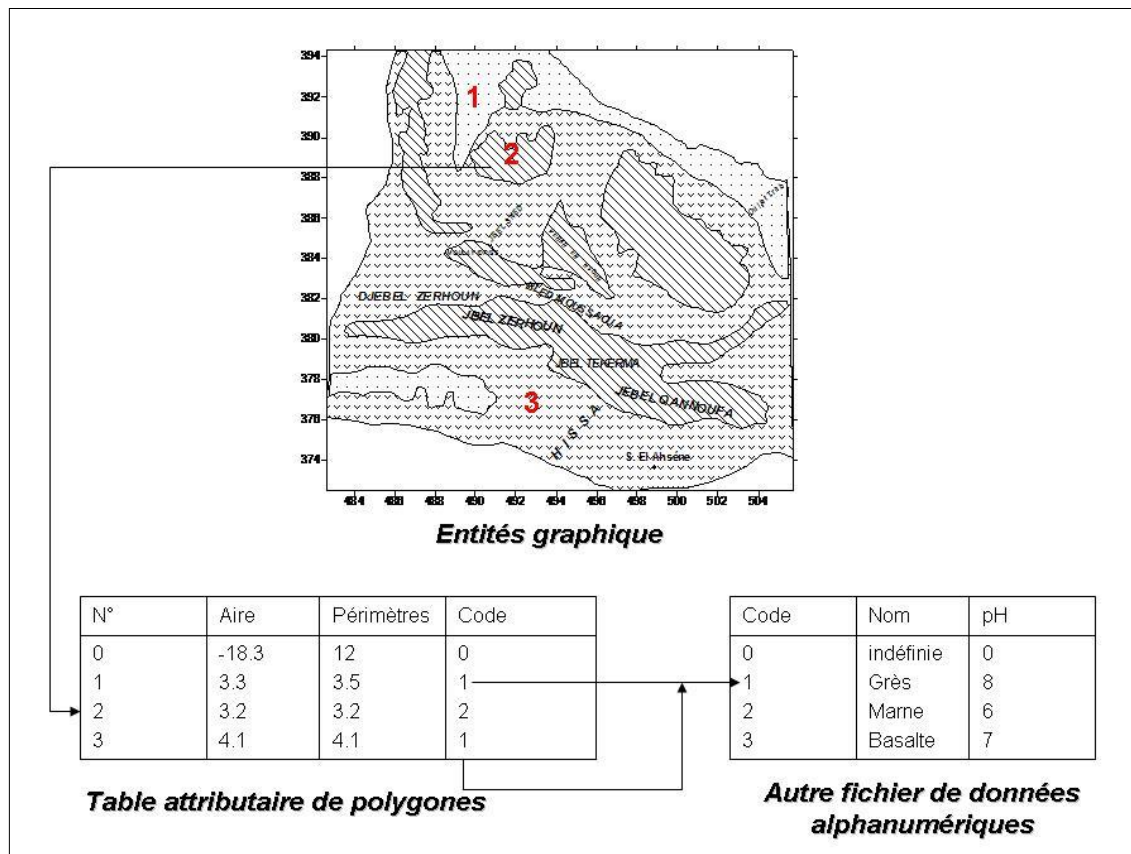


Fig.17 Structure d'une couche d'information

Chapitre IV : Modélisation et analyse spatiale

1. Introduction :

Dans un SIG, le monde réel est modélisé sous forme de couches d'information séparées, relatives à différents thème (ex : réseau hydrographique, nature des sols, faciès géologiques, profondeur de la nappe, position des ouvrages hydrogéologiques...).

Ces couches (ou couvertures) peuvent être recombines pour analyse, pour la création d'un nouveau dossier (contenant l'ensemble des couches) ou simplement superposées pour visualisation ou pour impression.

Toutes les couches d'information spatiale sont géoréférencées (définition du lien existant avec la position à la surface de la terre).

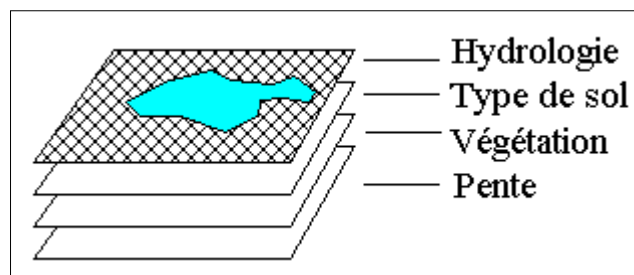
2. Notion de couche

Qu'est-ce qu'une couche ?

Une couche est un plan réunissant normalement des éléments géographiques de même type. La notion de couche peut être associée, par exemple, à celle des couches transparentes portant le dessin des différents éléments retrouvés sur les cartes topographiques. Une couche peut aussi être vue comme un compartiment logique du système d'information. Ainsi chaque couche représente un sous-ensemble " thématique " des informations retrouvées dans le SIG. On dit qu'il s'agit d'un plan car dans la majorité des cas, les données géographiques incorporées dans les SIG sont bidimensionnelles. Les limites de la couche, dans certains cas définies (comme pour les S.I.G. Idrisi, MapInfo, etc.), dans d'autres cas non-exprimée dans la base d'information (comme c'est le cas pour AtlasGis), constituent généralement les limites de la région d'étude. Certains systèmes rangent chacune des couches dans un fichier distinct alors que d'autres vont rassembler toutes les couches d'une même base dans un seul fichier. La structuration en couches est associée de près avec le modèle " géorelationnel ". D'autres modes de structuration, notamment les structures de type " objet " fonctionnent de façon légèrement différente. Le recours à des couches est toutefois le mode de structuration de loin le plus répandu.

Quelques exemples de couches :

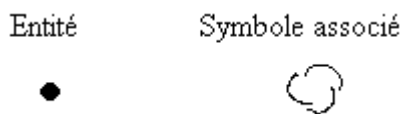
- la couche des routes
- la couche des rivières
- la couche de l'occupation du sol
- la couche des pentes



3. La modélisation cartographique en mode vectoriel

La modélisation cartographique vectorielle demande que l'on associe un objet graphique, aussi appelé cartographique, à une entité géographique. Un bâtiment peut ainsi devenir un point, une rivière peut devenir une ligne, un lac un polygone, etc. **La modélisation devrait être essentiellement fonctionnelle, c'est-à-dire qu'elle soit faite pour pouvoir rattacher des attributs à l'entité. La modélisation ne devrait pas être faite dans un but exclusif de représentation cartographique.** Malheureusement on trouve dans certaines bases de données une certaine confusion entre les deux niveaux. Idéalement, on modélise de façon fonctionnelle et on associe une symbolisation à chaque entité.

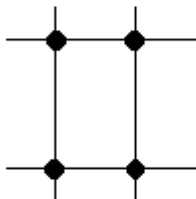
Exemple : modélisation d'un arbre sur une carte à grande échelle



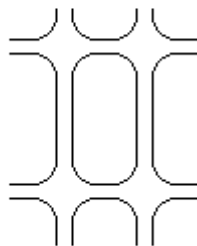
L'entité est un point (auquel on peut rattacher des attributs, comme l'âge, l'espèce, etc.). On lui associe un symbole graphique comprenant trois lignes.

Exemple : modélisation des rues

Segments de lignes



Polygones



4. La modélisation cartographique en mode matriciel

La modélisation en mode matriciel procède d'une toute autre façon que celle, beaucoup plus riche, qui se fait en mode vectoriel.

▪ Notion d'objet et de pixels

Une matrice est normalement formée d'éléments de forme et de taille uniformes appelés pixels. Ceux-ci, contrairement aux coordonnées X,Y, possèdent une superficie. Les points, lignes et polygones sont donc toujours représentés par des surfaces. C'est le fait de visualiser la matrice qui peut nous renseigner sur le type topologique des différentes entités. Une ligne sera par exemple un long groupe de pixels très étroit. En résumé, ici, la notion d'entité géographique de même que la notion d'objet cartographique n'existe pas vraiment. On retrouve simplement des groupes de pixels contigus ayant les mêmes valeurs. Les pixels qui

ne correspondent à aucune entité porte souvent zéro comme valeur. Il sont toutefois présents dans la matrice et occupe le même espace géographique et informatique.

▪ **Couche identifiant et la modélisation entité-relation**

Les couches matricielles sont composées de pixels qui sont simplement des valeurs numériques. La plupart du temps, ces valeurs reflètent la classe du pixel (par exemple : le type de sol) ou l'envergure d'un phénomène (par exemple la pente). Très souvent, ils ne renseignent pas sur l'identifiant de l'entité géographique. Ainsi, on ne présente pas, comme c'est le cas du côté des vecteurs, les identifiants et les coordonnées d'une part, et les identifiant et attributs d'autre part. On présente seulement les attributs.

Dans les cas où plusieurs attributs sont rattachés à des entités géographiques, il peut être utile de créer d'abord une matrice d'identifiant et, à partir d'une table d'attributs, créer des matrices contenant les valeurs d'attributs.

Exemple :

Créer un ensemble de matrices contenant des attributs se rattachant aux secteurs de recensement.

Créer d'abord une matrice-identifiant contenant les numéros des secteurs de recensement et ensuite produire des matrices pour l'âge moyen et le pourcentage de francophones par secteur de recensement à l'aide d'une table d'attribut.

| COUCHE-IDENTIFIANT | | | | | | | |
|--------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 3 | 3 |
| 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 3 | 3 |

| TABLE D'ATTRIBUTS | | |
|-------------------|-----------|-----------|
| S.R. | ÂGE MOYEN | % FRANCO. |
| 1 | 53 | 64 |
| 2 | 49 | 71 |
| 3 | 51 | 89 |

5. Taches d'analyse spatiale :

Il existe différentes catégories d'analyse spatiale. Celles-ci englobent les mesures spatiales, les relations spatiales, la collocation et la covariance spatiale. Lorsque les tâches d'analyse sont terminées, l'opérateur peut prendre les décisions d'accepter ou de rejeter un résultat spécifique. Dans un système de référence donné, l'opérateur peut effectuer une série de mesures, telles que :

- Longueur,
- Surface,

- Volume,
- Forme,
- Irrégularité de la forme,
- Partie d'une ligne ou d'une surface,
- Pente et orientations ou exposition de la pente,
- Etc

De même, l'utilisateur a aussi la possibilité d'étudier les relations spatiales pour extraire de l'information géométrique liée à un système de référence ou extraire une information non métrique liée à un domaine topologique. Ce dernier type d'information consiste à déterminer par exemple :

- La connectivité,
- L'orientation,
- L'agencement,
- Le contenu.

6. Fonction d'analyse d'un SIG :

En principe, les tâches et les opérations d'analyse réalisées dans le cadre d'un SIG sont gérées par des routines informatiques. Malgré que chacune de ces routines ait un objectif précis, elle est basée sur des fonctions d'extraction, de reclassification ou de superposition.

a) Extraction de données

Les fonctions d'extraction des données utilisent l'algèbre booléenne. Ce dernier, appliqué sur les attributs et les propriétés spatiales, fait appel aux opérateurs : ET, OU, négation et OU exclusif.

b) Reclassification des données

La reclassification des données est une étape qui suit l'étape d'extraction. C'est ainsi que l'opérateur peut visualiser les résultats et décider sur la nouvelle structure des données. De plus, la reclassification doit tenir compte de toute opération de fusion de séparation. Par exemple, un segment commun à deux zones fusionnées doit être éliminé de la base de données.

c) Superposition des données

En générale, l'opérateur ne travaille pas avec un seul type de données, mais, plusieurs types de données. De même, il peut avoir besoin de connaître, par exemple, les zones caractérisées par un certain type de sol, ayant une utilisation spécifique et espacées des zones urbaines d'une certaine distance. Dans ce cas, l'opérateur a besoin au moins de deux cartes (carte de

classification des sols, carte d'utilisation des sols). Ainsi, la méthode usuelle consiste à superposer des transparents correspondant à chacune des cartes et de limiter les zones d'intérêt. En fait, cette méthode, considérée comme étant un SIG classique, est très fatigante et demande beaucoup de temps. Le SIG informatisé résout ce problème en faisant appel à la superposition des couches correspondant à chaque type de données.

La superposition de deux ou plusieurs couches résulte en une nouvelle couche. Cette dernière contient tous les éléments qui répondent aux critères spécifiés par l'opérateur. La liste, ci-après, présente en détail les opérations de superposition qu'un SIG informatisé est en mesure d'accomplir.

Opérations ponctuelles

- Addition,
- Soustraction,
- Multiplication,
- Division,
- Exponentiation,
- Fonctions trigonométriques,
- Fonctions logarithmiques,
- Racine carrée,
- Moyenne,
- Couverture (couvrir une carte des cellules non nulles d'une autre carte),
- Combinaison booléenne,
- Détermination des limites maximales et minimales,
- Extraction ou isolation,
- Détermination de la fréquence de distribution,
- Etc.

Opérations zonales

- reclassification ou renomination des unités de la légende
- détermination de la surface, périmètre, longueur,
- reclassification des régions en se basant sur la surface,
- superposition et intersection de deux réseaux de polygones,
- recherche booléenne sur les zones,
- classification des zones en basant sur l'inclusion.

Opérations de voisinages

- détermination des sites en se basant sur la distance ou intervalle de valeurs d'une cible donnée,
- utilisation des fonctions de surface continue (pente, orientation et exposition de la pente, profil),
- utilisation des fonctions qui génèrent une surface continue à partir des données point (interpolation),
- formation des courbes de niveau,
- interpolation,
- utilisation des fonctions sur des surfaces continues ou détermination du plus court chemin,
- détermination des zones en se basant sur un point connu.

d) Concepts fondamentaux d'analyse spatiale par un SIG

- **Sélection de base (requête)**

Elle consiste à sélectionner les objets représentant un certains critères. Nous pouvons sélectionner tous les objets présents sur une couche d'information déterminée, ou en sélectionnant les objets selon un attribut : exemple sélectionner les douars ayant plus de 300 habitants.

- **Zone tampon**

La génération de tampon (Corridor ou Buffer) indique la création de nouveaux polygones à partir de détails ponctuels, linéaires et zonaux appartenants à la banque de données. A partir d'un point ou d'une série de points, tampons circulaires ou carrées peuvent être calculés ; de même, à partir des segments ou des polygones.

- **Opérations Booléennes**

Les opérations booléennes ne sont pas communicatives comme des opérations mathématiques. Le résultats de « A and B or C » dépend de la propriété du « and » rapport avec « or ». Nous utilisons des parenthèses pour la priorité de l'opération, (A and B) or C.

Ces opérations ne sont pas uniquement applicables sur les attributs mais peuvent aussi être applicables sur les propriétés spatiales comme la dimension et la forme.

- **Superposition**

La structure de logiciel SIG, permet de disposer les données sur différentes couches. Il devient donc possible de faire des opérations avec les différentes couches (Figure9). On peut soustraire des éléments d'une couche de ceux d'une deuxième couche, ou additionner les

éléments de ces deux couches. Le résultats apparaît sur une troisième couche avec les nouveaux éléments reliés à de nouveaux attributs (Figure 9).

La méthode d'identification des impacts environnementaux consiste à indiquer sur diverses couches des composantes environnementales (ou contraires) pour une entité géographique donnée. La superposition de plusieurs couches permet d'envisager l'impact global des contraintes d'un projet quelconque. Les incompatibilités résultent alors nettement. La superposition cartographique favorise l'analyse d'alternative d'aménagement (Figure).

Le SIG sont donc employés afin de déterminer les contraintes, les sensibilités et les impacts potentiels sur l'environnement. Les informations de références spatiales peuvent ainsi être emmagasinées dans d'importantes bases de données qui seront ultérieurement traitées par superposition cartographique. L'avantage évident des SIG est bien sur la capacité de stockage, de traitement et la vitesse d'exécution. De plus la réutilisation des données antérieures est facilitée par le support informatique.

En outre l'utilisation des SIG en étude d'impact environnemental a l'avantage dans le cas de projets redondants ou répétitifs, étant donnée les moyens importants (temps, argent et personnel) qui doivent être mise en oeuvre afin de réaliser un projet de SIG.

▪ **Proximité**

A partir d'un élément ponctuel, linéaire ou zonale, il est possible de sélectionner des éléments présents à l'intérieur d'un rayon ou d'une distance fixée par l'utilisateur. Exemple : connaître les douars qui se trouvent à l'intérieur d'une zone de 5Km le long d'une adduction.

▪ **Interpolation spatiale**

L'interpolation spatiale est une caractéristique importante des SIG. Nous pouvons l'utiliser pour :

- générer des contours afin de présenter des données graphiquement,
- calculer certaines priorités d'une surface à un point précis,
- changer l'unit de certaines comparaisons lorsque nous utilisons différentes structures de données sur différentes couches.

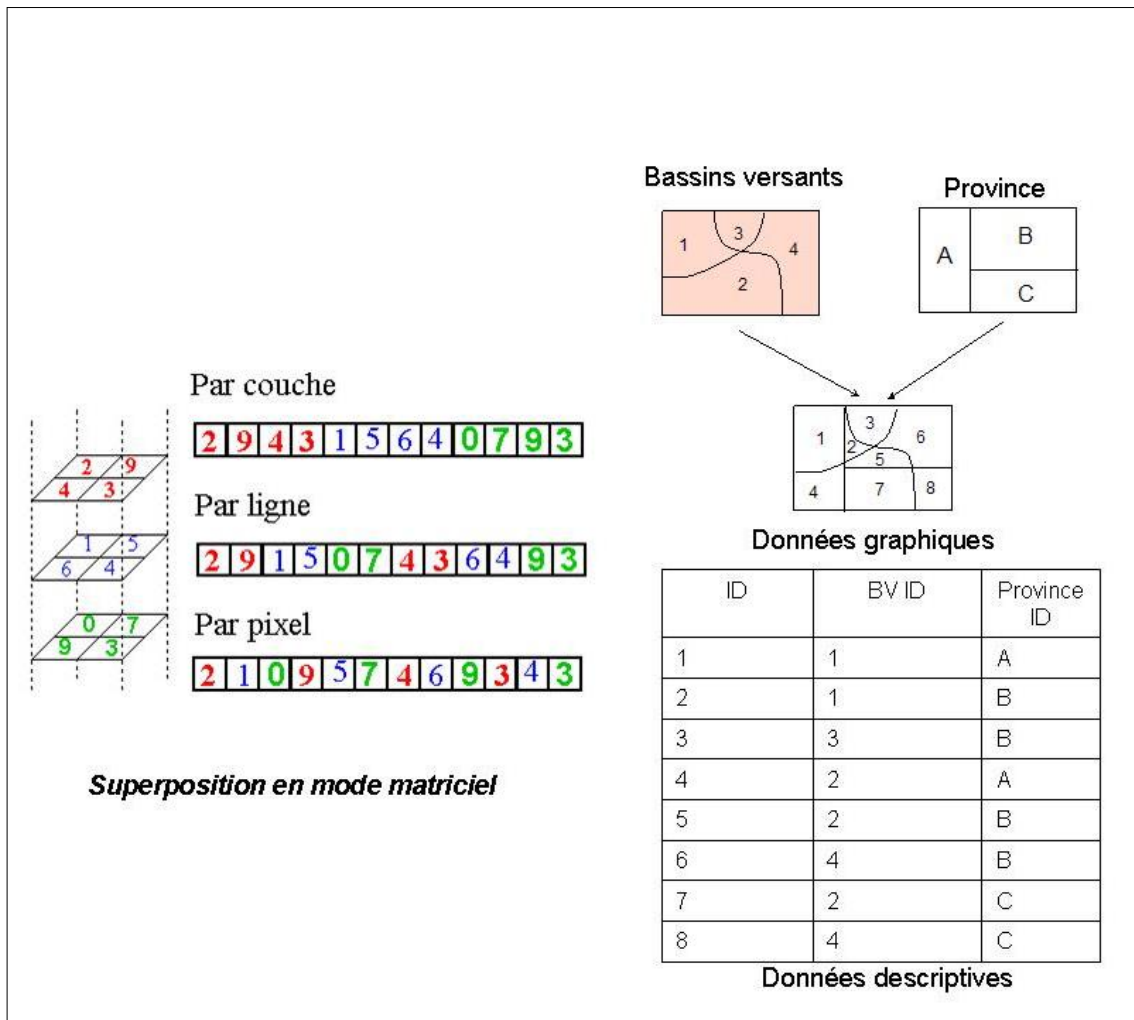


Fig. 18 : Superposition de deux couches d'informations par ArcInfo

Chapitre V : les principaux SIG les plus utilisés

1. LOGICIELS LIBRES

GRASS GIS : aussi connu pour avoir été le plus gros projet géomatique OpenSource. Il regroupe des fonctionnalités raster (en particulier des modules classiques de traitement et d'analyse d'images de télédétection) ainsi que des fonctionnalités vecteurs (rappelons que GRASS est un SIG à base topologique). Disponible pour Linux, Mac OS X, Unix et Windows.

QGIS : logiciel de cartographie basé sur la bibliothèque *Qt*. Il est disponible sous Linux (KDE), Mac OS X, ou Windows. Il permet notamment la visualisation "à la volée" des couches de données comme des shapefiles ainsi que leur modification. Il permet aussi de produire des fichiers à publier sur MapServer. Son ergonomie le rend simple à utiliser.

gvSIG : une application SIG libre développée en Java permettant d'accéder à des données en fichiers SIG (GML, SHP) ou CAD (DWG, DXF, DGN), à des bases de données spatiales (PostGIS, MySQL, Oracle) ou serveur (WMS, WCS, WFS, Catalogue ou Gazzeteet), pour Linux, Windows et Mac OS X, et dont l'interface utilisateur est en français et treize autres langues.

MapServer : logiciel de publication de carte sur Internet. Il peut être utilisé pour réaliser des applications Web, mais également pour publier des services Web conformes aux recommandations de l'Open Geospatial Consortium (WMS, WFS, WCS).

2. LOGICIELS COMMERCIAUX

ArcGis : Le logiciel ArcGis est un logiciel d'information géographique qui a été développé par la société américaine ESRI. ArcGis a développé différentes gammes de produits:

SIG Bureautique: ArcView, ArcEditor, ArcInfo,

SIG Serveur: ArcIMS, ArcGis Server, ArcGis Image Server,

SIG pour développeurs: Extensions afin de développer SIG Bureautique,

SIG Nomade: ArcPad et ArcGis pour travail de terrain.

MapInfo Professional : est un logiciel SIG (Système d'information géographique) édité par la société Pitney Bowes Software (PBS), créé dans les années 1980 aux États-Unis. MapInfo Professional est un logiciel destiné aux chargés d'étude et d'aménagement territorial, aux chargés d'études d'implantation, de géomarketing, aux analystes des réseaux physiques et commerciaux.

AutoCAD Map 3D: Développé par l'éditeur Autodesk, AutoCAD Map 3D est un logiciel de CAO 3D pour la conception cartographique. Il permet de consulter et d'exploiter des données

CAO et SIG issues de différentes sources. Il est utilisé dans le monde entier pour des projets d'envergure par des services publics et de télécommunication (Service des eaux et de l'Energie de Los Angeles par exemple), dans le secteur des transports (Petrobras Transporte S.A au Brésil, entre autres) ainsi que dans les travaux publics, l'aménagement et la gestion du territoire (comme la ville de Fribourg en Suisse).

Chapitre VI : présentation de quelques applications de SIG

Partie 1 : Analyse multicritère (le cas de choix d'un site pour les rejets de déchets)

La sélection appropriée des sites de stockage des déchets ménagers et industriels est un des principes fondamentaux de gestion des déchets, qui devant guider les acteurs de l'élimination des déchets à préserver l'environnement et à protéger la santé de la population. Elle représente ainsi, un domaine intégré au système urbain de gestion durable des déchets.

La démarche appliquée dans le cadre de cette recherche (figure 19) nécessite une compilation des données géographiques relatives à plusieurs disciplines comme la géomorphologie, la géologie, l'hydrologie et l'hydrogéologie, la climatologie, la télédétection, la pédologie, la botanique et la démographie. Dans chacune des disciplines, nous avons utilisé des techniques variées de spatialisation comme la géostatistique, la régression multiple, l'analyse en composantes principales, les classifications supervisées ou non supervisées... Ces techniques ont permis la création de six documents spatiaux de base en format raster ou vecteur (le modèle numérique d'altitude et ses dérivés, l'occupation du sol, la carte lithologique et ses dérivés, la carte des sols, la carte de population et la carte piézométrique du bassin) et l'établissement de six cartes mensuelles hydro-climatiques en format raster exprimant une simulation de la continuité spatiale des principaux processus hydrologiques : précipitations, températures, aridité, évapotranspiration, ruissellement et infiltration. Le caractère multidisciplinaire intervient à la fois au niveau de l'information collectée sur la zone d'étude et à celui de l'analyse (Collet, 1992). Ces plans d'information ont été par la suite combinés par des méthodes d'analyse multicritère pour produire une information synthétique sur les sites les plus appropriés au stockage des déchets.

La complexité et la diversité des données relatives à l'environnement, donc à la sélection des sites de dépôt final ont favorisé le développement des nouvelles technologies (satellites et micro-informatiques) capables de répondre aux besoins de collecte, de saisie, d'analyse, de gestion et de représentation cartographique. Grâce à ces progrès, les Systèmes d'Information à Référence Spatiale (SIRS) et la télédétection (TD) sont devenus des outils incontournables d'aide à la prise de décision pour la compréhension et le suivi des phénomènes

d'aménagement et de planification, ainsi que pour l'évaluation de l'état et l'évolution des ressources naturelles. Ces nouveaux outils ont permis de traiter et de gérer dans des délais raisonnables une grande quantité d'information en intégrant leur dimension spatiale et temporelle.

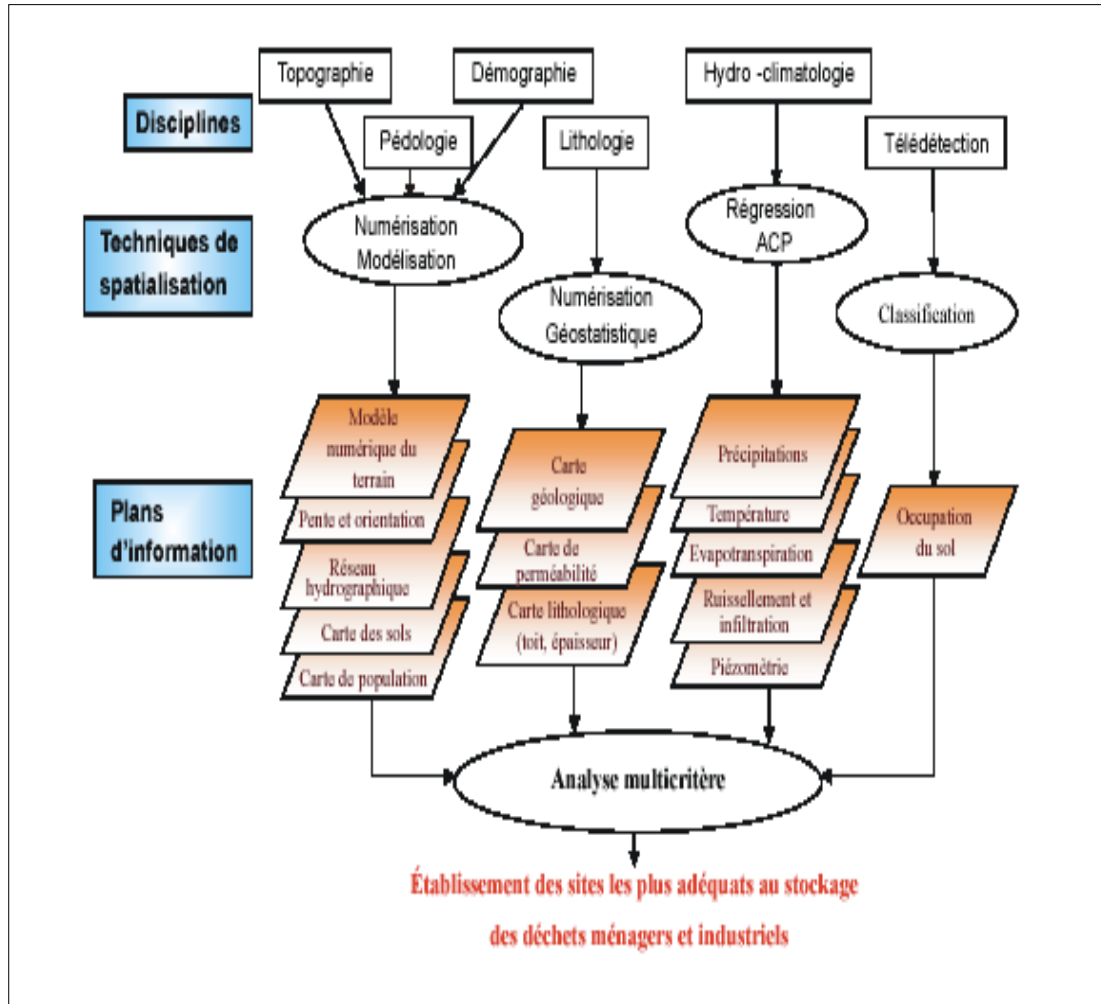


Fig.19 : schéma générale présentant la démarche d'étude

Partie 2 : réalisation de la carte de vulnérabilité des nappes par la méthode DRASTIC

1. Définition de la vulnérabilité d'une nappe à la pollution

La vulnérabilité d'une nappe matérialise la facilité avec laquelle elle peut être atteinte par une pollution provenant de la surface du sol. Cette pollution peut être engendrée par une source ponctuelle (décharge, herbicides, épandage des eaux usées domestiques, etc...). Cette vulnérabilité dépend des conditions naturelles se trouvant ces nappes.

Les principaux paramètres influençant la vulnérabilité d'une nappe à la pollution :

- la recharge : c'est la lame d'eau qui s'infiltré à travers le sol et la zone non saturée pour alimenter la nappe souterraine ;
- le sol : il intervient essentiellement par sa texture, par son épaisseur et par ses constituants organiques et minéraux pour la dégradation des polluants et pour le ralentissement de l'écoulement vertical de l'eau ;
- la zone non saturée : plus la perméabilité de cet horizon est importante et son épaisseur (ou profondeur de la surface de la nappe) est faible, plus la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution est importante ;
- Interaction avec les eaux superficielles ;

2. Description de la méthode DRASTIC

Méthode qui a été élaborée par L. Aller et al en 1987 et fait partie du groupe des méthodes (d'évaluation de la vulnérabilité des aquifères) pondérées, basées sur l'attribution d'une : notion aux différents paramètres utilisés et leurs groupement dans des classes différentes. Par suite, une pondération de ces notes est effectuée prenant en considération l'importance de chaque paramètre utilisé pour la caractérisation de la vulnérabilité des nappes à la pollution.

Cette méthode tient compte de sept paramètres ci-dessous relatifs au sol, à la zone non saturée et à la zone saturée de nappe. Une importance particulière est accordée à la nature et à l'épaisseur de la zone non saturée.

[D] : La profondeur du plan de la nappe d'eau souterraine (ou Deep). Lorsque cette profondeur est élevée, le contaminant met beaucoup de temps pour atteindre la surface piézométrique de la nappe ;

[R] : Recharge nette, c'est le vecteur principal du polluant. Plus cette recharge est importante plus le risque de contamination des eaux souterraines est élevé ;

[A] : Nature lithologique de l'aquifère, caractérisée par la granulométrie des terrains saturés. Ce paramètre intervient dans la piégeage du polluant qui peut s'échapper au pouvoir d'absorption du sol. Plus la granulométrie est fine, plus le piégeage du polluant sera grand ;

[S] : Sol, caractérisé par une activité biologique et chimique importante. Plus il est riche en éléments fins (argile, silt, limon...), plus son pouvoir protecteur est important ;

[T] : Topographie des terrains. Plus la pente topographique est grande, plus le ruissellement superficiel est important et donc moins l'infiltration des eaux et des polluants est importante.

[I] : Impact de la zone non saturée, caractérisé à partir de la texture lithologique des terrains constituant cette zone. Plus la texture est grossière (sables grossiers, graviers...), plus le temps de percolation du contaminant jusqu'à la surface de la nappe est faible.

[C] : Conductivité hydraulique ou perméabilité de la zone saturée. Plus ce paramètre est grand, plus le transfert horizontal du polluant dans la nappe est rapide.

Le tableau 1 ci-dessous contient les poids attribués à chacun des paramètres ci-dessus par la méthode DRASTIC. Le poids le plus élevé (5) est attribué à la nature lithologique et à l'épaisseur de la zone non saturée. Les poids les plus faibles (1 et 2) sont attribués respectivement à la pente et à la nature lithologique du sol.

| Classe | Poids |
|--|------------|
| Classe I : - la profondeur de la nappe - la nature lithologique de la zone non saturée | 5 5 |
| Classe II : - la recharge - la nature lithologique de la zone saturée | 4 3 |
| Classe III : - la texture du sol - la topographie | 2 1 |

Tableau 3 : poids attribués aux paramètres DRASTIC (Aller et al, 1987)

Les tableaux de 2 à 7 contiennent les notes attribuées à chacun des paramètres DRASTIC définis ci-dessus (Aller et al, 1987)

| Classe (en m) | Note |
|----------------|------|
| 0.0- 1.5 | 10 |
| 1.5- 4.5 | 9 |
| 4.5- 9.0 | 7 |
| 9.0- 15.0 | 5 |
| 15.0- 23.0 | 3 |
| 23.0-30 | 2 |
| Supérieur à 30 | 1 |

Tableau 4 : Classes et notes retenues pour le paramètre D (profondeur à la nappe)

| Classe (en mm/an) | Note |
|-------------------|------|
| 0- 50 | 1 |
| 50- 100 | 3 |
| 100- 175 | 6 |
| 175- 255 | 8 |
| Supérieur à 255 | 9 |

Tableau 5 : Classes et notes retenues pour le paramètre R (recharge de la nappe)

| Nature lithologique | Note | Note typique |
|----------------------------------|--------|--------------|
| Shale massif | [1-3] | 2 |
| Métamorphique altéré, grès lités | [2-5] | 3 |
| Calcaire | [3-5] | 4 |
| Shales en séquence | [5-9] | 6 |
| Calcaire massif | [4-9] | 6 |
| Grès massif | [4-9] | 6 |
| Sable et gravier | [6-9] | 8 |
| Basalte | [2-10] | 9 |
| Calcaire karstique | [9-10] | 10 |

Tableau 6 : Classes et notes retenues pour le paramètre A (nature lithologie de l'aquifère)

| Plage e la pente en % | Note |
|-----------------------|------|
| 0 – 2 | 10 |
| 2 – 6 | 9 |
| 6 – 12 | 5 |
| 12 –18 | 3 |
| Supérieurs à 18 | 1 |

Tableau 7 : Classes et notes retenues pour le paramètre T (pente topographique)

| Nature lithologique | Note | Note typique |
|--|--------|--------------|
| Silt et argile | [2-6] | 3 |
| Shale | [2-6] | 3 |
| Calcaire | [2-5] | 3 |
| Grés | [2-7] | 6 |
| Shales et gravier avec passage de silt et argile | [4-8] | 6 |
| Sable et gravier | [4-8] | 8 |
| Basalte | [2-10] | 9 |
| Calcaire karstique | [8-10] | 10 |

Tableau 8 : Classes et notes retenues pour le paramètre I (impact de la zone non saturée)

| Plage de perméabilité de la nappe en m/s | Note |
|--|------|
| [1.5 E-7 , 5 E-5] | 1 |
| [5 E-5 , 15 E-5] | 2 |
| [15 E-5 , 33 E-5] | 4 |
| [33 E-5 , 5 E-4] | 6 |
| [5 E-4 , 9.5 E-4] | 8 |
| Supérieur à 9.5 E-4 | 10 |

Tableau 9 : Classes et notes retenues pour le paramètre C conductivité hydraulique)

Une fois les différentes classes définies et leurs notes attribuées, la méthode détermine l'indice DRASTIC (Id) qui permet de caractériser le degré de vulnérabilité d'un secteur donné de la nappe. La vulnérabilité est d'autant plus importante que l'indice calculé est élevé cet indice est défini de la manière suivante :

$$Id = (Dr \times Dw) + (Rr \times Rw) + (Ar \times Aw) + (Sr \times Sw) + (Tr \times Tw) + (Ir \times Iw) + (Cr \times Cw)$$

Avec :

D, R, A, S, T, I, C : représente les paramètres DRASTIC définis précédemment

r et w : représentent respectivement le poids et la note attribués à chaque paramètre

DRASTIC

L'établissement de la carte de vulnérabilité d'une nappe consiste à reporter dans l'espace les valeurs de l'indice DRASTIC et leurs groupements dans cinq classes différentes. Chacune de ces classes est représentée par une couleur : les couleurs chaudes (rouge et rose) sont attribuées aux zones les plus vulnérables et les couleurs froides (bleu et vert) sont attribuées aux zones les moins vulnérables à la pollution. Les zones de vulnérabilité moyenne sont représentées par la couleur jaune.

Le grand intérêt de cette méthode réside dans sa standardisation et sa grande utilisation dans le monde. Elle permet de comparer facilement la vulnérabilité des nappes situées dans différentes régions d'un même pays ou dans des pays différents.

3. Méthodologie appliquée par le SIG

Etape 1 : Acquisition des données

▪ Base de données spatiales du SIG

Cette base est composée d'un ensemble de documents cartographiques digitalisés sur une table à digitaliser ou directement sur l'écran de l'ordinateur à partir de documents préalablement scannés. Nous citerons ci-dessous le contenu de cette base de données spatiales :

- fond topographique,
- fond géologique,
- esquisse pédologique,
- carte de situation des forages et des sondages de reconnaissances,
- carte de profondeur de la nappe/sol,
- cartes des zones de recharge de la nappe,
- carte de la conductivité de l'eau de la nappe,
- carte de la pente.

▪ Base de données thématiques :

Cette base contient les données alpha-numérique relatives aux cartes et documents constituant la base de données spatiales du SIG élaboré avec lesquels elles sont liées. Ces données sont synthétisées dans une seule table qui contient les données des forages et les sondages de reconnaissances de la zone. Elle a pour objet de décrire les faciès lithologiques des différents horizons de l'aquifère : zone non saturé, zone saturée et substratum.

Etape 2 : analyse multicritère

Etablissement de la carte de vulnérabilité d'une nappe consiste à reporter dans l'espace les valeurs de l'indice DRASTIC et leurs groupements dans cinq classes différentes. Chacune de ces classes est représentée par une couleur.

Partie 2 : création d'un modèle numérique de terrain (MNT)

Les modèles numériques de terrain sont des fichiers altimétriques, constitués par un réseau mailé régulier, chaque maille étant repérée par les coordonnées de son centre (x, y, z). De l'origine des données dont ils dérivent, dépend leur qualité, c'est-à-dire leur précision et leur valeur représentative.

Etape 1 : numérisation des courbes de niveau

La première étape de la création d'un MNT consiste à numériser les courbes de niveau sur une carte topographique. Il existe aujourd'hui des méthodes informatisées qui permettent de numériser les courbes automatiquement. Le résultat est restitué dans un fichier numérique en format vecteur. L'utilisateur qui veut économiser de l'argent et qui possède du temps devant lui, peut numériser les courbes manuellement.

Etape 2 : exportation d'un fichier vectoriel et la conversion en format matriciel

La deuxième étape consiste à exporter le fichier numérique contenant les courbes de niveau dans un système d'information géographique matriciel. Cette étape est nécessaire dans la plupart des cas puisqu'on utilise généralement le mode matriciel pour travailler avec MNT. Les SIG vectoriels possèdent toutes des fonctions 'exportation

- **Exportation d'un fichier vectoriel :**

De façon générale, cette opération est simple à exécuter. Chaque SIG possède des modules d'importation et d'exportation. L'utilisateur doit spécifier le format d'exportation et le nombre d'attributs à préserver. Dans le cas qui nous intéresse, le nombre d'attributs est de 1 et correspond à la valeur d'élévation de la courbe de niveau.

- **Importation d'un fichier vectoriel dans un SIG matriciel :**

Encore une fois, cette opération s'effectue simplement. Le SIG matriciel possède des modules d'importation et d'exportation qui permettent d'importer le fichier vectoriel. A noter ; à cette étape, le fichier est toujours en mode vectoriel.

▪ Conversion d'un fichier vectoriel en format matriciel :

La conversion est une étape capitale qui influence directement la qualité du MNT. Tout d'abord, l'utilisateur doit spécifier la *résolution du pixel*. Cette résolution doit être adéquate pour le fichier numérique afin de limiter au maximum la perte d'information. On utilise habituellement une résolution qui égale à l'intervalle des courbes de niveau de la carte topographique.

Etape 3 : Interpolation des courbes de niveau

Qu'est ce qu'une interpolation

L'Interpolation prédit les valeurs des cellules dans un raster à partir de données ponctuelles d'échantillons. Elle peut être utilisée pour prédire des valeurs inconnues pour toute donnée ponctuelle géographique. Altitudes, précipitations, concentrations chimiques, niveaux sonores, etc. Les graphiques ci-dessous illustrent l'interpolation. En haut, on a un jeu de données de point des valeurs connues. En bas, on a un raster interpolé à partir de ces points. Les valeurs inconnues sont prédites sur la base d'une formule mathématique utilisant les valeurs des points proches.

Dans cet exemple les points en entrée tombent sur les centres des cellules – c'est assez peu vraisemblable en pratique. L'un des problèmes avec la création de raster par interpolation est que les informations de départ se détériorent dans une certaine mesure – même lorsqu'un point de données tombe dans une cellule, rien ne garantit que la cellule aura exactement la même valeur.

L'interpolation est basée sur l'hypothèse que des objets distribués spatialement sont corrélés spatialement ; en d'autres termes que des choses qui sont rapprochées tendent à avoir des caractéristiques similaires. Par exemple, s'il neige d'un côté de la rue, vous pouvez prédire avec un niveau de confiance élevé qu'il neige également de l'autre côté de la rue. Vous afficheriez moins de certitude s'il neigeait à l'autre bout de la ville et seriez encore moins affirmatif quant à l'état du temps dans le pays voisin.

L'étape de l'interpolation a pour objectif d'attribuer une valeur d'élévation aux pixels qui n'en possèdent pas (valeur=0) en se basant sur la valeur connue des pixels voisins, les pixels de la matrice résultante auront une valeur d'altitude.

Il existe plusieurs méthodes d'interpolation. La méthode basée sur le plus proche voisin est habituellement utilisée pour l'interpolation de données linéaires (dans notre cas, les courbes de niveau). L'utilisateur possède le choix de considérer le nombre de voisins qu'il désire. Plus

l'algorithme recherche un grand nombre de voisins, plus le temps de calcul est élevé. La valeur attribuée au pixel est habituellement pondérée en fonction de la distance

Etape 4 : Visualisation d'un MNT

Calcul de la pente

La fonction pente (Slope) calcule le taux maximum de changement entre chaque cellule et ses voisines ; par exemple, le taux maximum de descente d'une cellule (changement maximum d'altitude entre la cellule et ses voisines). Chaque cellule du raster de sortie possède une valeur de pente. Plus la valeur de la pente est faible, plus le terrain est plat ; plus la valeur de la pente est élevée, plus le terrain est pentu. Le jeu de données de pente de sortie est calculable en termes de pourcentage ou de degrés de pente.

L'orientation

Le SIG permet également d'extraire de l'information sur l'orientation des versants. Dans l'exemple ci-dessous, les orientations sont regroupées pour former plusieurs classes de couleurs différentes, représentant les orientations.

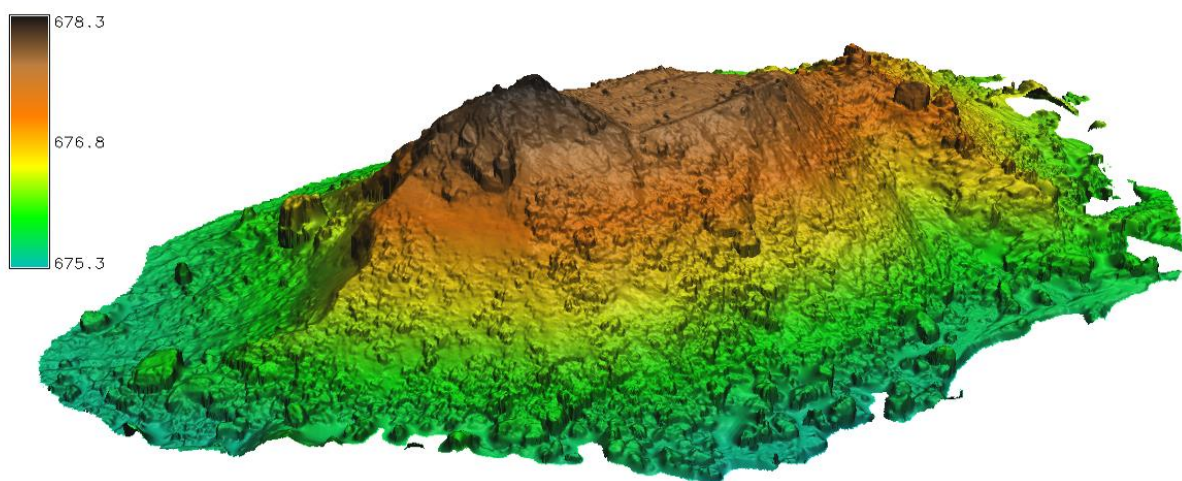


Fig. 20 : présentation d'un Modèle numérique de terrain

.....

REFERENCES

- Aller, L., T. Bennett, J.H. Lehr, R.J. Petty, and G. Hackett. 1987. DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. Environmental Protection Agency NWWA/EPA Series EPA-600/2-87-035. Dublin, Ireland: National Water Well Association.
- Bouron, P., 2005, Cartographie, lecture de carte. École Nationale des Sciences Géographiques, Institut Géographique National. Paris. http://cours-fad-public.ensg.eu/pluginfile.php/1319/mod_resource/content/1/LDC_Mini.pdf
- Burrough, P. A., 1986, Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment (Oxford: Clarendon Press).
- Collet, C., 1992. Le Système d'Information Géographique en mode image. Presse polytechniques et universitaires Romande, Suisse. 186p.
- Dickinson, H.J. AND Calkins, H.W., 1988. The Economic Evaluation of Implementing a GIS, International Journal of Geographical Information Systems, 2(4): 307 - 327.
- Didon, E., 1990. Système d'information géographique: concepts, fonctions, applications. Laboratoire commun de Télédétection CEMAGREF-ENGREF – Montpellier.
- Dueker, K.J., 1979. Land Resource Information Systems : A Review of Fifteen Years Experience, Geo-Processing, Vol.1, pp.105-128.
- ESRI 2014. ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- Kennedy, M., Kopp, S., 2000, Comprendre les projections. GIS by ESRI. Environmental Systems Research Institute, Inc.
- Poidevin, D., 1999, Manuel de cartographie, Extrait de son ouvrage « la carte moyen d'action », Editions Ellipses, 96p. <http://www.uel.br/cce/geo/didatico/omar/manuel-cartographie.pdf>
- Tissot, N.A., 1881. Mémoire sur la représentation des surfaces et les projections des cartes géographiques. Paris: Gauthier-Villars.
- Tomlinson, R. F., 1967. An introduction to the geo-information system of the Canada land inventory. Department of forestry and rural development Ottawa- CANADA.